



M 2015

AVALIAÇÃO DA HUMIDADE UTILIZANDO A TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS

CARLA FILIPA DA SILVA FARIA
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA
À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM
ÁREA CIENTÍFICA

AVALIAÇÃO DA HUMIDADE UTILIZANDO A TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS

CARLA FILIPA DA SILVA FARIA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientadora: Professora Doutora Eva Sofia Botelho Machado Barreira

26 DE JUNHO DE 2015

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2014/2015

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-5081446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-5081440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2014/2015 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

À minha mãe

*Procure a sabedoria e aprenda a escrever os capítulos mais importantes da sua história nos
momentos mais difíceis da sua vida.*

Augusto Cury

AGRADECIMENTOS

Concluída esta etapa, considero importante enumerar as pessoas que direta e indiretamente me ajudaram e me acompanharam ao longo da minha vida, do meu percurso académico e na concretização deste objetivo pessoal.

Deste modo, começo por prestar em especial agradecimento e gratidão à Professora Doutora Eva Barreira, orientadora científica do presente trabalho, pela disponibilidade e auxílio prestado, pelo conhecimento transmitido e pela simpatia demonstrada.

O meu agradecimento ao Laboratório de Física das Construções da Feup, pelo fornecimento dos materiais e equipamentos utilizados e pelo acolhimento durante a realização dos ensaios, em especial à engenheira Sofia, engenheira Joana e engenheiro Pedro pela disponibilidade prestada durante a realização dos mesmos.

Um obrigado aos meus colegas da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro pela ajuda e amizade criada ao longo dos meus dois primeiros anos académicos. Obrigado também aos meus colegas de Feup, em especial às meninas do futsal, que me ajudaram na integração da equipa, assim como na faculdade. O meu agradecimento às amigadas que por cá fiz, nomeadamente, há Joana Pires, Fabiana Mota e Ângela Vaz.

Em especial ao Nelson Torres, meu melhor amigo de longa data. E à Sara Peixoto, Sandra Alves e Fabio Leitão.

Há minha grande amiga Ângela Vieira, o futebol uniu-nos e fez do companheirismo futebolístico uma amizade forte.

Há Eduarda Leal por se ter tornado um pilar na minha vida, por me dar força, motivação e alegria.

Por fim, agradeço aos meus pais, José Carlos e Maria Emília, as minhas irmãs, Ângela e Emília e à minha família. Em especial há minha mãe, que sempre me apoiou, me ajudou nos piores momentos, me abraçou e me deu confiança para ingressar neste sonho, sem ela não estaria aqui hoje. Obrigada pelo sacrifício, pela paciência, pela confiança depositada em mim, pela ajuda ao longo destes anos e por nunca me deixares desistir.

RESUMO

Muitos edifícios atuais apresentam manifestações patológicas, grande parte delas associadas à presença de humidade e à existência de fissuração. Este facto origina alterações ao seu desempenho ao nível da resistência mecânica, degradação dos materiais, durabilidade e aspeto.

A termografia de infravermelhos apresenta-se como uma técnica promissora para a inspeção de edifícios e diagnóstico de patologias por ser não destrutiva e permitir obter resultados em tempo real. A maioria das patologias está relacionada com a variação de temperatura, por isso, a sua origem e a sua extensão poderá ser avaliada recorrendo a câmaras de infravermelhos, que mostram as variações de temperatura através de imagens térmicas.

Neste trabalho abordam-se os conceitos teóricos fundamentais relacionados com a termografia de infravermelhos, e faz-se o levantamento bibliográfico de estudos já desenvolvidos que utilizam a termografia de infravermelhos no diagnóstico de patologias relacionadas com a humidade.

Através de ensaios em laboratório, avaliam-se as potencialidades da termografia de infravermelhos para o diagnóstico de patologias relacionadas com a humidade e com a existência de fissuração, através de um processo de humidificação e secagem de alguns materiais fissurados e não fissurados. Também são testadas as vantagens da utilização da termografia ativa bem como de metodologias de análise quantitativas, nomeadamente, as diferenças de temperatura entre a zona molhada e a zona seca (ΔT) e as funções de contraste (TC e TRC).

PALAVRAS-CHAVE: Termografia de infravermelhos, deteção de humidade, termografia ativa e passiva, análise qualitativa e quantitativa, ensaios laboratoriais

ABSTRACT

Many current buildings present pathological manifestations, most of them associated to the presence of moisture and cracking. This leads to changes in its performance in the level of mechanical resistance, degradation of materials, durability and appearance.

The infrared thermography presents as one promising technique for building inspection and diagnosis of diseases for not being destructive and allow to get results in real Time. Most pathologies are related to temperature range, so, its origin and extension may be evaluated using infrared cameras that show how temperature variates through thermal imager.

In this work are addressed the theoretical concepts related to infrared thermography, that makes up the bibliographic survey studies already developed, which use an infrared thermography in the diagnosis of related disorders with moisture.

Through laboratory tests we can evaluate how infrared thermography, allow the diagnosis of diseases related to moisture and cracking of existence, through humidification process and drying materials of some cracked and fissured materials. It's also tested the advantages of using thermography active as well as quantitative analysis methodologies, such as temperature differences between one wet area and one dry area (ΔT) and the contrast functions (TC and TRC).

KEYWORDS: Infrared thermography, moisture detection, active and passive thermography, qualitative and quantitative analysis, laboratory tests.

ÍNDICE GERAL

1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS DO TRABALHO	1
1.1. MOTIVAÇÃO DO TEMA	1
1.2. INTERESSES E OBJETIVOS DO TRABALHO	2
1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DO TRABALHO	2
2. TRANSMISSÃO DE CALOR POR RADIAÇÃO	5
2.1. PRINCIPAIS FUNDAMENTOS DA TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS	5
2.1.1. O ESPETRO DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICO	5
2.1.2. RADIAÇÃO DO CORPO NEGRO.....	6
2.1.3. RADIAÇÃO DO CORPO NÃO-NEGRO	8
2.1.4. FATORES QUE INFLUENCIAM A MEDIÇÃO DA RADIAÇÃO INFRAVERMELHA.....	9
2.1.5. CLASSIFICAÇÃO DA TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS	11
2.1.6. IDENTIFICAÇÃO DE ANOMALIAS ATRAVÉS DA TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS.....	11
2.1.6.1. Análise qualitativa vs análise quantitativa	11
2.1.6.2. Diferença visual no termograma.....	12
2.1.6.3. Diferencial de temperatura (Delta-T)	12
2.1.6.4. Função de contraste.....	13
2.2. ESTUDOS REALIZADOS POR OUTROS AUTORES (TERMOGRAFIA VS HUMIDADE).....	14
2.2.1. “OPTIMAL THERMOGRAPHIC PROCEDURES FOR MOISTURE ANALYSIS IN BUILDING MATERIALS” (1991) ..	14
2.2.2. “APPLICATION OF INFRARED THERMOGRAPHY TECHNIQUE IN BUILDING FINISH EVALUATION” (2000) ...	14
2.2.3. “TRABALHOS DESENVOLVIDOS PELO LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL (2002 - 2007) ..	15
2.2.4. “PASSIVE INFRARED THERMOGRAPHY – A QUALITATIVE METHOD FOR DETECTING MOISTURE ANOMALIES IN BUILDING ENVELOPES” (2006)	15
2.2.5. “AVALIAÇÃO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO USANDO TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS” (2007) ..	15
2.2.6. “DETEÇÃO TERMOGRÁFICA PASSIVA DE PROBLEMAS DE HUMIDADE EM FACHADAS COM REVESTIMENTO EM CERÂMICO ADERENTE” (2014).....	16
2.2.7. “CRITERIA FOR APPLICATION AND IDENTIFICATION OF ANOMALIES ON THE FACADES OF BUILDINGS WITH THE USE OF PASSIVE INFRARED THERMOGRAPHY” (2015)	16
3. ANÁLISE QUALITATIVA DE RESULTADOS.....	17
3.1. NOTA INTRODUTÓRIA.....	17
3.2. O EQUIPAMENTO DO LABORATÓRIO DE FÍSICA DAS CONSTRUÇÕES – LFC.....	19
3.2.1. THERMO TRACER TH9100 MR	19

3.2.2. PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO DA CÂMARA	20
3.3. ENSAIO TIPO I	21
3.3.1. PROCEDIMENTOS DO ENSAIO	21
3.3.2. RESULTADOS OBTIDOS	24
3.3.2.1. Betão	24
3.3.2.2. Betão Celular Autoclavado	26
3.3.2.3. Madeira	29
3.3.2.4. Pedra Granítica	31
3.3.2.5. Tijolo Cerâmico Furado	33
3.3.2.6. Tijolo Cerâmico Maciço	35
3.4. ENSAIO TIPO II	38
3.4.1. PROCEDIMENTOS DO ENSAIO	38
3.4.2. RESULTADOS OBTIDOS	40
3.4.2.1. Betão	40
3.4.2.2. Betão Celular Autoclavado	42
3.4.2.3. Madeira	44
3.4.2.4. Pedra Granítica	45
3.4.2.5. Tijolo Cerâmico Furado	47
3.4.2.6. Tijolo Cerâmico Maciço	48
3.5. ENSAIO TIPO III	50
3.5.1. PROCEDIMENTOS DO ENSAIO	50
3.5.2. RESULTADOS OBTIDOS	51
3.6. ENSAIO TIPO IV	53
3.6.1. PROCEDIMENTOS DO ENSAIO	53
3.6.2. RESULTADOS OBTIDOS	54
3.7. SÍNTESE CRÍTICA	55
4. ANÁLISE QUANTITATIVA DOS RESULTADOS	57
4.1. NOTA INTRODUTÓRIA	57
4.2. ENSAIO TIPO I	59
4.2.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS PROVETES DE BETÃO	59
4.2.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS PROVETES DE BETÃO CELULAR AUTOCLAVADO	61
4.2.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS PROVETES DE MADEIRA	62
4.2.4. ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS PROVETES DE PEDRA GRANÍTICA	64

4.2.5. ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS PROVETES DE TIJOLO FURADO.....	65
4.2.6. ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS PROVETES DE TIJOLO MACIÇO	66
4.3. ENSAIO TIPO II.....	68
4.3.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS PROVETES DE BETÃO CELULAR AUTOCLAVADO.....	68
4.3.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS PROVETES DE TIJOLO MACIÇO	74
4.4. ENSAIO TIPO III.....	80
4.5. ENSAIO TIPO IV	82
4.6. SÍNTESE CRÍTICA.....	84
5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	85
5.1. CONCLUSÕES FINAIS	85
5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	86
 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 87

ANEXO A – CARACTERÍSTICAS DA CÂMARA TERMOGRÁFICA THERMO TRACER TH9100 MR

ANEXO B – TERMOGRAMAS OBTIDOS NA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Espectro eletromagnético [4]	6
Figura 2.2 - Distribuição espectral da radiação emitida por um corpo negro (adaptada de [9])	7
Figura 2.3 - Radiação incidente na superfície de um material (absorção, transmissão e reflexão) (adaptado de [5])	8
Figura 2.4 – Variação da Emissividade espectral do corpo negro, cinzento, real e espelho perfeito (adaptado [11])	9
Figura 2.5 - Efeitos que intervêm na medição da radiação infravermelha (adaptado de [5])	10
Figura 2.6 – Termografia da fachada norte do Bloco A às 15h durante o período seco, em que se demonstra os pontos utilizados no calculo do delta-T (adaptado de [18]).	13
Figura 3.1 - Thermo Tracer TH9100 MR.....	20
Figura 3.2 – Equipamento utilizado na medição da temperatura e humidade relativa	20
Figura 3.3 - Diferentes fases para determinar a temperatura refletida de uma amostra	21
Figura 3.4 - Local de montagem do ensaio.....	22
Figura 3.5 – Variação da massa ao longo do ensaio dos provetes BB1, BB2 e BB3	24
Figura 3.6 - Variação da ascensão capilar ao longo do ensaio do provete BB1, BB2 e BB3	24
Figura 3.7 – Termograma dos provetes BB1.01, BB2.01 e BB3.01 (secos)	25
Figura 3.8 – Nível da água detetado no provete BB1.17, BB2.17 e BB3.17, visualmente e na imagem térmica, às 100:20 horas (final da fase de embebição)	25
Figura 3.9 – Final da fase de secagem dos provetes BB1.31, BB2.31 e BB3.31 (tempo de ensaio= 192h00)	26
Figura 3.10 - Variação da massa ao longo do ensaio dos provetes BC1 e BC3.....	26
Figura 3.11 – Variação da ascensão capilar ao longo do ensaio dos provetes BC1 e BC3	27
Figura 3.12 – Termograma dos provetes BC1.01 e BC3.01 (secos).....	27
Figura 3.13 – Nível da água detetado no provete BC1.17, visualmente e na imagem térmica, às 100:20 horas (final da fase de embebição)	28
Figura 3.14 - Final da fase de secagem do provete BC1.31 e BC3.31 (tempo de ensaio= 192h00) ...	28
Figura 3.15– Variação da massa ao longo do ensaio dos provetes M1, M3, M4 e M5	29
Figura 3.16 – Variação da ascensão capilar ao longo do ensaio dos provetes M1, M3, M4 e M5	29
Figura 3.17– Termograma dos provetes M1.01, M3.01, M4.01 e M5.01 (secos).....	30
Figura 3.18 – Nível da água detetado no provete M1.17, M3.17, M4.17 e M5.17, visualmente e na imagem térmica, às 100:20 horas (final da fase de embebição)	30
Figura 3.19 – Final da fase de secagem do provete M1.31, M3.31, M4.31 e M5.31 (tempo de ensaio= 192h00)	31
Figura 3.20 – Variação da massa ao longo do ensaio dos provetes G1 e G3	31

Figura 3.21 – Variação da ascensão capilar ao longo dos provetes G1 e G3	32
Figura 3.22 – Termograma dos provetes G1.01 e G3.01 (secos)	32
Figura 3.23 – Nível da água detetado no provete G1.017 e G3.17, visualmente e na imagem térmica, às 100:20 horas (final da fase de embebição)	33
Figura 3.24 – Final da fase de secagem do provete G1.31 e G3.31 (tempo de ensaio= 192h00)	33
Figura 3.25 – Variação da massa ao longo do ensaio do provete TF1	34
Figura 3.26 – Variação da ascensão capilar ao longo do ensaio do provete TF1	34
Figura 3.27 – Termograma dos provetes TF1.01 (secos)	34
Figura 3.28 – Nível da água detetado no provete TF1.17, visualmente e na imagem térmica, às 100:20 horas (final da fase de embebição)	35
Figura 3.29 – Final da fase de secagem do provete TF1.31 (tempo de ensaio= 192h00)	35
Figura 3.30 – Variação da massa ao longo do ensaio dos provetes TM1 e TM3	36
Figura 3.31 – Variação da ascensão capilar ao longo dos provetes TM1 e TM3	36
Figura 3.32 – Termograma dos provetes TM1.01 e TM3.01 (secos)	37
Figura 3.33 – Nível da água detetado nos provetes TM1.017 e TM3.017, visualmente e na imagem térmica, às 100:20 horas (final da fase de embebição)	37
Figura 3.34 – Final da fase de secagem dos provetes TM1.31 e TM3.31 (tempo de ensaio= 192h00)	38
Figura 3.35 – Local de montagem do ensaio	38
Figura 3.36 – Variação da massa ao longo do ensaio dos provetes BB1, BB2 e BB3	40
Figura 3.37 – Variação da ascensão capilar ao longo do ensaio do provete BB1	40
Figura 3.38 – Termograma dos provetes BB1.01, BB2.01 e BB3.01 (secos)	41
Figura 3.39 – Nível da água detetado nos provetes BB1.68 e BB2.68 visualmente e na imagem térmica, aos 5760 minutos (final da fase de embebição)	41
Figura 3.40 – Final da fase de secagem dos provetes BB1.135, BB2.135 e BB3.135 (tempo de ensaio = 6210 minutos)	42
Figura 3.41 – Variação da massa ao longo do ensaio dos provetes BC1 e BC3	42
Figura 3.42 – Variação da ascensão capilar ao longo do ensaio dos provetes BC1 e BC3	43
Figura 3.43– Nível da água detetado nos provetes BC1.68 e BC3.68 visualmente e na imagem térmica, aos 2850 minutos (final da fase de embebição)	43
Figura 3.44 – Final da fase de secagem do provete BC1.135 e BC3.135 (tempo de ensaio=3330 minutos)	44
Figura 3.45 – Variação da massa ao longo do ensaio dos provetes M1, M3, M4 e M5	44
Figura 3.46 – Variação da ascensão capilar ao longo do ensaio dos provetes M1, M3, M4 e M5	44
Figura 3.47 – Nível da água detetado nos provetes M1.68, M3.68, M4.68 e M5.68 visualmente e na imagem térmica, aos 2850 minutos (final da fase de embebição)	45

Figura 3.48 – Final da fase de secagem dos provetes M11.135, M3.135, M4.135 e M5.135 (tempo de ensaio=3330 minutos)	45
Figura 3.49 – Variação da massa ao longo do ensaio dos provetes G1 e G3	46
Figura 3.50 – Variação da ascensão capilar ao longo do ensaio dos provetes G1 e G3	46
Figura 3.51 – Nível da água detetado nos provetes BC1.68 e BC3.68 visualmente e na imagem térmica, aos 2850 minutos (final da fase de embebição)	46
Figura 3.52 – Final da fase de secagem do provete G1.135 e G3.135 (tempo de ensaio=3330 minutos)	47
Figura 3.53– Variação da massa ao longo do ensaio do provete TF1	47
Figura 3.54– Variação da ascensão capilar ao longo do ensaio do provete TF1	47
Figura 3.55 – Nível da água detetado nos provetes TF1.68 visualmente e na imagem térmica, aos 5760 minutos (final da fase de embebição)	48
Figura 3.56 – Final da fase de secagem dos provetes TF1.135 (tempo de ensaio=6210 minutos)	48
Figura 3.57 – Variação da massa ao longo do ensaio dos provetes TM1 e TM3	49
Figura 3.58 – Variação da ascensão capilar ao longo do ensaio dos provetes TM1 e TM3	49
Figura 3.59 – Nível da água detetado nos provetes TF1.68 visualmente e na imagem térmica, aos 5760 minutos (final da fase de embebição)	50
Figura 3.60 – Final da fase de secagem dos provetes TM1.135 e TM3.135 (tempo de ensaio=6210 minutos)	50
Figura 3.61 – Local de montagem do ensaio	51
Figura 3.62 – Termograma do provete BB4.01, M4.01 e M6.01 (secos)	52
Figura 3.63– Termogramas dos provetes BB4.26, M4.26 e M6.26 aos 120 minutos (final do período de aquecimento)	52
Figura 3.64 - Termograma do provete M6.17 no período de aquecimento	52
Figura 3.65– Final da fase de arrefecimento dos provetes BB4.45, M4.45 e M6.45 (tempo de ensaio=210 minutos)	53
Figura 3.66 – Termograma do provete BB4.01, M4.01 e M6.01 (secos)	54
Figura 3.67 – Possíveis anomalias detetadas nos provetes BB4.26, M4.26 e M6.26 aos 120 minutos (com lâmpada infravermelha ligada)	54
Figura 3.68 – Final do ensaio dos provetes BB4.51, M4.51 e M6.51 (tempo de ensaio=240 minutos)	55
Figura 4.1 – Procedimento 1	57
Figura 4.2 – Procedimento 2	58
Figura 4.3 – Procedimento 3	58
Figura 4.4 – Variação do delta-T em função do tempo para os provetes BB1, BB2 e BB3 para o procedimento 1-A	59
Figura 4.5 – Variação do delta-T em função do tempo para os provetes BB1, BB2 e BB3 para o procedimento 1-B	59

Figura 4.6 – Variação do delta-T em função do tempo para os provetes BB1, BB2 e BB3 para o procedimento 2	60
Figura 4.7 – Variação do delta-T em função do tempo para os provetes BC1 e BC3 para o procedimento 1-A	61
Figura 4.8 – Variação do delta-T em função do tempo para os provetes BC1 e BC3 para o procedimento 1-B	61
Figura 4.9 – Variação do delta-T em função do tempo para os provetes BC1 e BC3 para o procedimento 2	62
Figura 4.10 – Variação do delta-T em função do tempo para os provetes M1, M3, M4 e M5 para o procedimento 1-A	62
Figura 4.11 – Variação do delta-T em função do tempo para os provetes M1, M3, M4 e M5 para o procedimento 1-B	63
Figura 4.12 – Variação do delta-T em função do tempo para os provetes M1, M3, M4 e M5 para o procedimento 2	63
Figura 4.13 – Variação do delta-T em função do tempo para os provetes G1 e G3 para o procedimento 1-A	64
Figura 4.14 – Variação do delta-T em função do tempo para os provetes G1 e G3 para o procedimento 1-B	64
Figura 4.15 – Variação do delta-T em função do tempo para os provetes G1 e G3 para o procedimento 2	64
Figura 4.16 – Variação do delta-T em função do tempo para os provetes TF1 para o procedimento 1-A	65
Figura 4.17 – Variação do delta-T em função do tempo para os provetes TF1 para o procedimento 1-B	65
Figura 4.18 – Variação do delta-T em função do tempo para os provetes TF1 para o procedimento 2	66
Figura 4.19 – Variação do delta-T em função do tempo para os provetes TM1 e TM3 para o procedimento 1-A	66
Figura 4.20 – Variação do delta-T em função do tempo para os provetes TM1 e TM3 para o procedimento 1-B	67
Figura 4.21 – Variação do delta-T em função do tempo para os provetes TM1 e TM3 para o procedimento 2	67
Figura 4.22 - Variação do delta-T em função do tempo para os provetes BC1 e BC3 para o procedimento 1-A	68
Figura 4.23 - Procedimento 1-A nos provetes de betão BC1 aos 96 minutos e BC3 aos 150 minutos	68
Figura 4.24 - Variação do delta-T em função do tempo para os provetes BC1 e BC3 para o procedimento 1-B	69
Figura 4.25 - Variação do delta-T em função do tempo para os provetes BC1 e BC3 para o procedimento 2	69

Figura 4.26 - Função de contraste TC em função do tempo para os provetes BC1 e BC3 para o procedimento 1-A	70
Figura 4.27 - Função de contraste TC em função do tempo para os provetes BC1 e BC3 para o procedimento 1-B	71
Figura 4.28 - Função de contraste TC em função do tempo para os provetes BC1 e BC3 para o procedimento 2	71
Figura 4.29 - Função de contraste TRC em função do tempo para os provetes BC1 e BC3 para o procedimento 1-A	72
Figura 4.30 - Função de contraste TRC em função do tempo para os provetes BC1 e BC3 para o procedimento 1-B	73
Figura 4.31- Função de contraste TRC em função do tempo para os provetes BC1 e BC3 para o procedimento 2	73
Figura 4.32 - Variação do delta-T em função do tempo para os provetes TM1 e TM3 para o procedimento 1-A	74
Figura 4.33 - Variação do delta-T em função do tempo para os provetes TM1 e TM3 para o procedimento 1-B	75
Figura 4.34 - Variação do delta-T em função do tempo para os provetes TM1 e TM3 para o procedimento 2	75
Figura 4.35 - Função de contraste TC em função do tempo para os provetes TM1 e TM3 para o procedimento 1-A	76
Figura 4.36 - Função de contraste TC em função do tempo para os provetes TM1 e TM3 para o procedimento 1-B	77
Figura 4.37 - Função de contraste TC em função do tempo para os provetes TM1 e TM3 para o procedimento 2	77
Figura 4.38 - Função de contraste TRC em função do tempo para os provetes TM1 e TM3 para o procedimento 1-A	78
Figura 4.39 - Função de contraste TRC em função do tempo para os provetes TM1 e TM3 para o procedimento 1-B	79
Figura 4.40- Função de contraste TRC em função do tempo para os provetes TM1 e TM3 para o procedimento 2	80
Figura 4.41 - Variação do delta-T em função do tempo para o provete M4 para o procedimento 3	80
Figura 4.42 - Procedimento 3 no provete M4 aos 15 minutos	81
Figura 4.43 - Funções de contraste TC e TRC em função do tempo para o provete M4 para o procedimento 3 na fase de aquecimento	81
Figura 4.44 - Método utilizado na conversão das medidas em centímetros para pixels	82
Figura 4.45 - Variação do delta-T em função do tempo para o provete M4 para o procedimento 3	82
Figura 4.46 - Procedimento 3 no provete M4 aos 50 minutos	83

Figura 4.47 - Funções de contraste TC e TRC em função do tempo para o provete M4 para o procedimento 3 na fase de aquecimento	83
---	----

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 - Características e propriedades dos provetes utilizados [37 - 39]	18
Quadro 3.2 - Descrição dos ensaios e as suas referências	19
Quadro 3.3 - Valores da temperatura, humidade relativa e temperatura refletida obtidos ao longo do ensaio Tipo I	23
Quadro 3.4 - Valores da temperatura, humidade relativa e temperatura refletida obtidos ao longo do ensaio Tipo II	39
Quadro 3.5 - Valores da temperatura, humidade relativa e temperatura refletida obtidos ao longo do ensaio Tipo III	51
Quadro 3.6 - Valores da temperatura, humidade relativa e temperatura refletida obtidos ao longo do ensaio Tipo IV	53

SÍMBOLOS

c - Velocidade da luz [$m \cdot s^{-1}$];

f - Frequência [Hz];

λ - Comprimento de onda [μm];

$E_{\lambda T}$ - Distribuição espectral da radiação emitida por um corpo negro a um determinado comprimento de onda λ (μm) e temperatura T (K);

h - Constante de Planck [$J \cdot s$];

k - Constante de Boltzmann [$J \cdot K^{-1}$];

T - Temperatura termodinâmica (K);

λ_{max} - Comprimento de onda máximo [μm];

R_t - Radiância espectral total do corpo negro [$W \cdot m^{-2}$];

σ - Constante de Stefan-Boltzmann $5,67 \times 10^{-8} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}]$;

α - Coeficiente de absorção, expressa a razão entre a radiação absorvida e a radiação incidente num corpo;

ρ - Coeficiente de reflexão, expressa a razão entre a radiação refletida e a radiação incidente num corpo;

τ - Coeficiente de transmissão, expressa a razão entre a radiação transmitida e a radiação incidente num corpo;

ΔT - Variação da temperatura [$^{\circ}C$];

$T_d(t)$ - Temperatura de área com defeito no tempo t [$^{\circ}C$];

$T_d(t_0)$ - Temperatura de área com defeito no tempo inicial t_0 [$^{\circ}C$];

$T_{sd}(t)$ - Temperatura de área sem defeito no tempo t [$^{\circ}C$];

$T_{sd}(t_0)$ - Temperatura de área sem defeito no tempo inicial t_0 [$^{\circ}C$];

$T_a(t)$ - Temperatura média da superfície no tempo t [$^{\circ}C$];

$T_a(t_0)$ - Temperatura média da superfície no tempo inicial t_0 [$^{\circ}C$];

T_0 - Tempo inicial [minutos];

TC - Thermal Contrast [-];

TRC - Thermal Runnig Contrast [-];

ρ - Densidade seca [kg].

1

ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS DO TRABALHO

1.1. MOTIVAÇÃO DO TEMA

As principais causas de patologias observadas em edifícios estão relacionadas com a humidade. A presença da humidade nos edifícios implica possíveis danos no desempenho dos materiais de construção, tais como, degradação do aspeto, diminuição da resistência mecânica e alteração da sua durabilidade. A humidade pode também provocar problemas de saúde, a nível respiratório, devido à degradação dos materiais.

A compreensão dos fenómenos que estão na origem das anomalias pode ser auxiliada pela medição da temperatura, uma vez que a maioria das patologias dos materiais estão associados a variação da temperatura.

A termografia de infravermelhos tem vindo a desenvolver um papel muito importante na deteção de anomalias, por ser uma técnica não destrutiva, rápida, menos dispendiosa e que não interfere com a vida e atividades dos utilizadores. Esta técnica baseia-se no princípio de que todos os materiais possuem a capacidade de emitir energia sob a forma de calor, na gama dos infravermelhos do espectro eletromagnético. Através dos ensaios termográficos é possível obter imagens térmicas que demonstram que quando existir variações de temperatura existe uma possível presença de anomalia.

Os ensaios termográficos podem ser realizados de duas maneiras diferentes, através da termografia ativa ou passiva. Na termografia ativa é necessário um estímulo externo para gerar diferenças relevantes de temperatura entre o objeto e o meio. Na termografia passiva não existe qualquer estimulação térmica artificial.

Os termogramas obtidos podem ser analisados de forma qualitativa ou quantitativa, dependendo do objetivo a que se propõe o ensaio. A análise qualitativa resulta da observação direta dos termogramas. Quando se pretende quantificar as variações de temperatura superficial do material ou elemento em estudo, opta-se por uma análise quantitativa, em que é necessário a introdução de parâmetros ambientais.

1.2. INTERESSES E OBJETIVOS DO TRABALHO

Este trabalho foi realizado com o objetivo principal de ampliar e fortalecer os conhecimentos sobre a termografia de infravermelhos, que se tem vindo a tornar uma técnica de inovadora, útil e em grande expansão, quando aplicada ao estudo da humidade em materiais de construção / elementos construtivos.

Neste sentido foram definidos vários objetivos parciais:

- Obtenção de conceitos teóricos fundamentais relacionados com a termografia de infravermelhos e o levantamento bibliográfico de estudos já desenvolvidos que utilizam a termografia de infravermelhos no diagnóstico de patologias relacionadas com a humidade.
- (detalhar os ensaios)
- Avaliação das potencialidades da termografia de infravermelhos enquanto técnica de diagnóstico de patologias relacionadas com a humidade e fissuração em materiais de construção, estudando o processo de humidificação e secagem de alguns materiais, com recurso a termografia ativa e passiva.
- Avaliação das diferentes formas de analisar os resultados (análise qualitativa e análise quantitativa) e aplicação de diferentes critérios de análise quantitativa, já utilizados em outras áreas da engenharia, adaptados ao estudo de anomalias relacionadas com a humidade.

1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em 5 capítulos distintos:

- No capítulo 1 é apresentado uma pequena introdução, onde estão descritos os principais objetivos a alcançar e a organização do trabalho.
- No capítulo 2 encontram-se descritos os principais princípios físicos relativos à radiação infravermelha, os fatores que influenciam a medição da radiação infravermelha, as distintas abordagens dos procedimentos termográficos e um conjunto de estudos já realizados sobre as potencialidades da termografia infravermelha aplicada ao diagnóstico de anomalias relacionadas com a humidade. Por fim, é apresentado um resumo das principais características da câmara termográfica utilizada nos ensaios, assim como, o procedimento de calibração da mesma.
- No capítulo 3, de caráter experimental, procedeu-se a uma análise qualitativa para quatro tipos de ensaio, nomeadamente:
 - Avaliação da humidificação por capilaridade seguida de secagem de provetes de materiais distintos sem fonte de calor;
 - Avaliação da humidificação por capilaridade seguida de secagem de provetes de materiais distintos com fonte de calor;
 - Detecção de fissuração interna e externa através de humidificação pelo topo, em dois materiais distintos com fonte de calor;
 - Detecção de fissuração interna e externa em dois materiais distintos com fonte de calor;
- No capítulo 4, também de caráter experimental, procedeu-se a uma análise quantitativa dos quatro tipos de ensaios descritos anteriormente. Analisou-se o delta-T e as funções de contraste TC e TRC, com o objetivo de avaliar a sua utilização para o diagnóstico de anomalias relacionadas com humidade e fissuração.

- Por último, no capítulo 5, apresentam-se as conclusões do trabalho, assim como algumas considerações para eventuais trabalhos futuros.

São ainda apresentados três anexos:

- Anexo A – Características da câmara termográfica Thermo Trace TH9100 MR;
- Anexo B – Termogramas obtidos durante a realização dos ensaios.

2

TRANSMISSÃO DE CALOR POR RADIAÇÃO

2.1. PRINCIPAIS FUNDAMENTOS DA TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS

2.1.1. O ESPETRO DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICO

No mecanismo de transferência de calor por radiação a energia pode ser transmitida mesmo que exista o vácuo perfeito, denominando-se como radiação eletromagnética. Todos os corpos, desde que se encontrem a uma temperatura superior a 0 Kelvin, emitem radiação continuamente e recebem radiação emitida pelos corpos envolventes. O tipo de radiação emitida e a sua intensidade depende da temperatura absoluta dos corpos que a emitem [1-3].

Para qualquer tipo de radiação a velocidade de propagação é a velocidade da luz ($c = 3,0 \times 10^8$ m/s), e cada uma possui como características uma dada frequência f e comprimento de onda λ , relacionando-se de acordo com a equação 2.1 [3]:

$$c = f \cdot \lambda \quad (2.1)$$

Em que:

c	Velocidade da luz ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);
f	Frequência (Hz);
λ	Comprimento de onda (μm).

As ondas eletromagnéticas assumem um espectro muito alargado e diverso em termos de comprimentos de onda, que vai desde os raios gama com comprimentos de onda curtos até às ondas de rádio com comprimentos de onda elevados [3].

A análise de radiação térmica incide num gama de radiação mais restrita com comprimentos de onda a variar entre 0,1 e 100 μm , onde está incluída a radiação UV (0,1 a 0,38 μm), a luz visível (0,38 a 0,76 μm) e a radiação infravermelha (0,76 a 100 μm). Como se pode verificar na figura 2.1 [3].

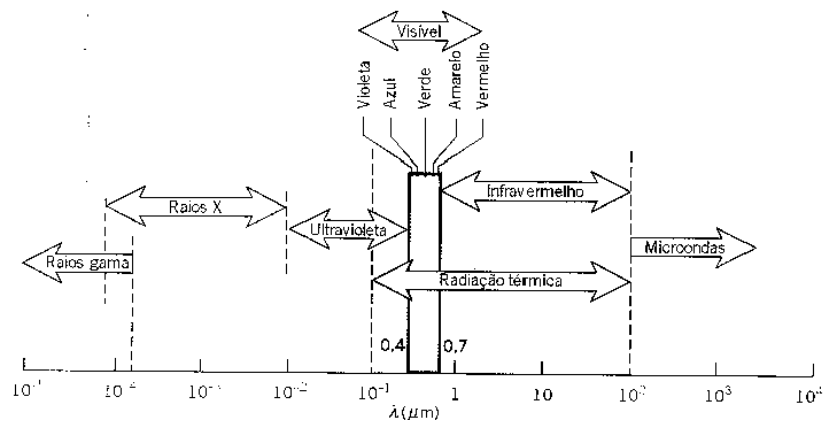


Figura 2.1 - Espectro eletromagnético [4]

No estado sólido, a matéria emite um espectro contínuo de radiação. A forma do espectro de radiação emitido, depende principalmente da temperatura a que se encontra o corpo [3,4].

Para temperaturas baixas, por norma, os corpos são visíveis pela luz que refletem e não pela radiação que emitem. Sem luz a incidir sobre eles, estes corpos não serão visíveis. Para temperaturas muito altas, os corpos têm luminosidade própria, uma vez que a radiação térmica que eles emitem na região do espectro visível começa a ser considerável. [6].

As propriedades radiantes dos sólidos dependem também da rugosidade superficial, pureza do material, espessura do revestimento, grau de polimento, ângulo formado pela direção de saída do fluxo radiante com a superfície e do comprimento de onda. Todavia, os valores exatos das propriedades radiantes de sólidos são muito complicados de especificar, uma vez que dependem de um grande número de variáveis [7].

2.1.2. RADIAÇÃO DO CORPO NEGRO

O conceito de corpo negro é imprescindível para a compreensão do fenómeno de transmissão de calor por radiação. Este é definido como um objeto que absorve toda a radiação que nele incide, independentemente da direção e do comprimento de onda. Considera-se então o corpo negro como um absorvedor perfeito, no entanto, e segundo a lei de Kirchhoff, este possui também a propriedade de reemitir toda esta energia, até se atingir o equilíbrio térmico com o meio envolvente [2-4].

Na realidade não existe nenhum objeto com as propriedades exatamente iguais às de um corpo negro, funcionando este apenas como um conceito teórico.

A radiação que é emitida pelo corpo negro pode ser descrita pelas seguintes leis [8]:

- Lei de Planck;
- Lei de Wien;
- Lei de Stefan-Boltzmann.

A lei de Planck é representada como um conjunto de curvas, em função da temperatura e do comprimento de onda (figura 2.2) [8,9]. Da análise do gráfico verifica-se que para uma dada temperatura, o poder emissivo varia continuamente com o comprimento de onda. Quanto mais elevada é a temperatura da superfície, menor é o comprimento de onda no qual é atingido o máximo valor do poder emissivo [9].

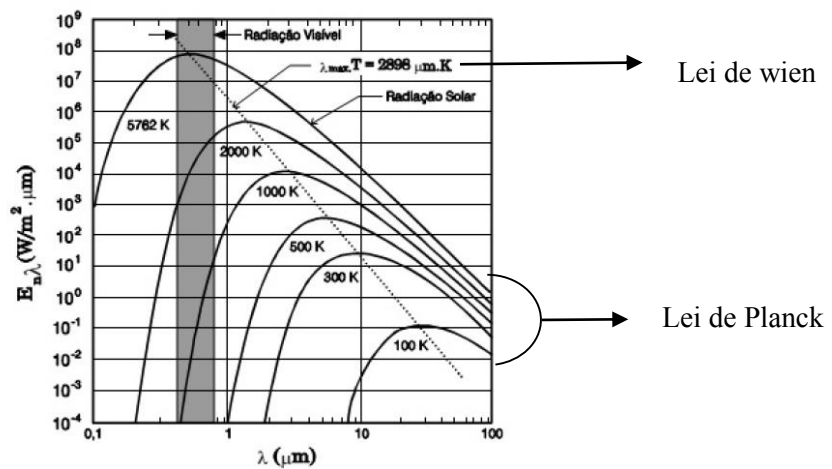


Figura 2.2 - Distribuição espectral da radiação emitida por um corpo negro (adaptada de [9])

Da aplicação da lei de Stefan-Boltzmann, consegue-se obter o valor total da radiância espectral de um corpo negro para uma dada temperatura. A equação (2.2) que a define, resulta da integração da Lei de Planck [8].

$$R_t = \sigma \cdot T^4 \quad (2.2)$$

Em que:

- R_t Radiância espectral total do corpo negro ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$);
- T Temperatura absoluta do corpo negro (K);

Estas três leis são bastante importante na utilização de técnicas termográficas, uma vez que a transmissão da energia infravermelha através da atmosfera depende do comprimento de onda.

Em determinadas partes das gamas de comprimento de onda tem-se zonas onde a absorção pelos gases não é significativa, desta forma dá-se a transmissão da energia eletromagnética. A transmissão da energia infravermelha é mais elevada na gama 3 – 4 μm e 8 - 13 μm , assim sendo, a câmara termográfica é sensível a comprimentos de onda em intervalos de 3 a 5,6 μm (sistemas industriais) e de 8 a 12 μm (sistemas militares e de pesquisa) onde a transmissão é maior [8 - 10].

2.1.3. RADIAÇÃO DO CORPO NÃO-NEGRO

Um corpo não-negro apenas absorve parte da radiação que sobre ele incide. Desta radiação, uma parte é refletida, outra é absorvida e outra é transmitida para um dado comprimento de onda, em que o seu somatório é sempre igual à unidade (equação 2.3) [2, 5].

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2.3)$$

Em que:

- α Coeficiente de absorção, expressa a razão entre a radiação absorvida e a radiação incidente num corpo;
- ρ Coeficiente de reflexão, expressa a razão entre a radiação refletida e a radiação incidente num corpo;
- τ Coeficiente de transmissão, expressa a razão entre a radiação transmitida e a radiação incidente num corpo.

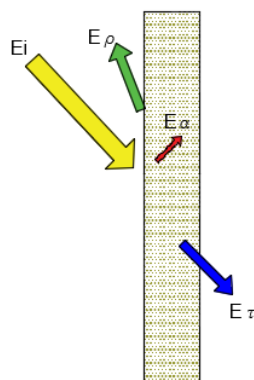


Figura 2.3 - Radiação incidente na superfície de um material (absorção, transmissão e reflexão)

Para que haja equilíbrio, a absorção de energia por um corpo tem de ser compensada pela energia que ele emite. Ao fator que caracteriza a energia emitida pelo corpo dá-se o nome de emissividade ε . Como explica a lei de Kirchhoff, para um dado material a uma determinada temperatura e um comprimento de onda, a absorção e emissividade espectral da sua superfície são iguais [8]:

$$\alpha = \varepsilon \quad (2.4)$$

Desta forma a equação 2.3 poderá ser expressa por:

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1 \quad (2.5)$$

Na figura 2.4 estão representados os valores da emissividade (ε) para alguns materiais, que ilustram os vários extremos da equação 2.5.



Figura 2.4 – Variação da Emissividade espectral do corpo negro, cinzento, real e espelho perfeito (adaptado [11])

2.1.4. FATORES QUE INFLUENCIAM A MEDIÇÃO DA RADIAÇÃO INFRAVERMELHA

O procedimento utilizado na técnica de termografia infravermelha é de fácil aplicação, no entanto, a análise de resultados pode ser complicada, e conduzir a conclusões erradas, se não se tomarem as devidas precauções na preparação e realização dos ensaios. Para tal, é fundamental conhecer os parâmetros que podem influenciar os resultados [5].

A emissividade de uma superfície é definida como a eficiência com que esta emite radiação comparativamente com um corpo negro sujeito à mesma temperatura. Esta varia em função de três fatores, tais como:

- Comprimento de onda;
- Temperatura da superfície;
- Orientação ou ângulo de observação em relação à superfície.

Para obter medições reais da temperatura, é fundamental conhecer o valor efetivo da emissividade da superfície que está a ser analisada. Este valor pode ser obtido através de métodos simplificados, ou utilizando listas de valores tabelados para a emissividade dos diferentes materiais. Ainda assim, deve-se ter em atenção que estes valores tabelados se referem a medições efetuadas em determinadas condições, particularmente, no que diz respeito à gama de comprimentos de onda, ao ângulo de medição, à temperatura do ensaio e ao acabamento da superfície do material [12].

A refletividade dos materiais pode influenciar os resultados de uma medição. A energia que é captada pela câmara termográfica é consequência da sobreposição de três efeitos (figura 2.5) [12]:

- O corpo reflete uma parte da energia emitida pelo ambiente, que é equivalente à emitida por um corpo negro para uma dada temperatura T_a ;
- Se o corpo é parcialmente transparente, transmite uma parte da radiação emitida pelo fundo, que corresponde à emitida por um corpo negro para uma dada temperatura T_f ;
- O corpo emite radiação própria, por se encontrar a uma dada temperatura T_0 .

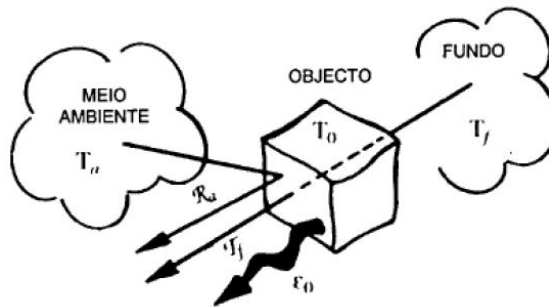


Figura 2.5 - Efeitos que intervêm na medição da radiação infravermelha (adaptado de [5])

Se um corpo se encontrar rodeado de outros corpos a temperaturas diferentes, maiores do que a sua, o parâmetro relacionado com a energia emitida para uma dada temperatura T_0 e emissividade E_0 , é alterado devido à reflexão por parte do corpo da radiação que sobre ele incide é emitida pelos objetos que o rodeiam [12].

A principal causa de problemas durante as medições é a atenuação atmosférica pois conduz a um erro sistemático, que depende da gama espectral utilizada, das condições meteorológicas e da distância de observação. Deve-se ter em atenção que as medições realizadas a mais de 10 metros devem ser corrigidas [5].

A existência de pontos de aquecimento localizados, a incidência solar, a ocorrência de sombreamento ou a velocidade do vento quando em contacto direto com a superfície analisada, o tipo de equipamento e a experiência do inspetor também podem influenciar a qualidade dos resultados [12,13]. A maior parte destes fatores pode ser detetada antes da realização do ensaio e ser registados ou, se possível, eliminados [5].

2.1.5. CLASSIFICAÇÃO DA TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS

A abordagem ao estudo termográfico pode ser feita de duas maneiras: através da termografia ativa e da termografia passiva [14]. Na termografia ativa, a superfície em estudo é arrefecida ou aquecida artificialmente de modo a gerar diferenças consideráveis de temperatura entre a superfície em estudo e o meio no qual está inserida. A captação das imagens termográficas pode ser efetuada durante a fase de aquecimento ou arrefecimento. Este contraste térmico pode ser induzido através de variadas fontes de energia, que divergem na forma como intervêm com a superfície em estudo [14].

De acordo com IBARRA-CASTANEDO et al., as fontes de energia podem ser classificadas como [14]:

- Externas - Quando a energia incide sobre a superfície e se propaga através do material até encontrar a anomalia;
- Interna - A energia é introduzida diretamente na amostra de modo a realçar os defeitos presentes.

As fontes de energia externa mais correntes são os sistemas óticos, tais como lâmpadas de halogéneo, lâmpadas de infravermelhos ou flashes fotográficos. À termografia ativa que utiliza fontes de energia interna dá-se o nome de termografia de ultrassom ou vibro-termografia [14].

A fonte de energia poderá situar-se do lado contrário ao da câmara de infravermelhos, originando um fluxo por transmissão, ou situada do lado do equipamento, permitindo uma inspeção por reflexão. Por norma, o método de transmissão é utilizado na deteção de descontinuidades na superfície oposta à aquecida, já o método de reflexão é utilizado para detetar descontinuidades na própria superfície aquecida [14,15].

Na termografia passiva, o estudo acontece sem que haja influência de qualquer fonte artificial externa de aquecimento ou arrefecimento ao estado natural da superfície. Por norma, o estado natural da superfície encontra-se a uma temperatura superior à temperatura ambiente, em que a fonte de irradiação ou o calor resultante do próprio processo é considerada como fonte natural. Esta abordagem ocorre em estudos de grandes estruturas como edifícios e pontes, mas também é aplicada com sucesso na medicina e em diversos processos industriais [14,15].

2.1.6. IDENTIFICAÇÃO DE ANOMALIAS ATRAVÉS DA TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS

2.1.6.1. Análise qualitativa vs análise quantitativa

A análise termográfica pode ser dividida em dois tipos: análise qualitativa e análise quantitativa [8]. A análise qualitativa pretende apenas fazer uma análise simples da imagem térmica, apontando as diferenças na temperatura superficial detetadas por observação visual. Esta análise é ideal para situações onde se pretende identificar a existência de uma anomalia [8].

A análise quantitativa difere da anterior, uma vez que é necessário uma quantificação exata da temperatura superficial ou da sua variação. É necessária uma correta calibração da câmara termográfica e a introdução de parâmetros de ajuste (distância, emissividade, temperatura refletida, entre outros) [17]. Também é necessário ter em atenção as variações causadas por modificações das propriedades dos

materiais e características da superfície, das condições atmosféricas, entre outros. Toda a informação recolhida durante o ensaio é processada através de um software adequado e analisada posteriormente [8].

2.1.6.2. Diferença visual no termograma

A identificação de defeitos visualiza-se a partir da diferença de cores em áreas que, à partida, deveriam ser homogêneas. A diferença visual no termograma é baseada na análise qualitativa [19].

Com base nas diferenças visuais é possível avaliar a distribuição de temperatura aparente de cada superfície analisada, detetar os pontos de distribuição anormal de temperatura, e proceder a uma avaliação qualitativa quanto ao tipo, extensão e importância das possíveis anomalias [19].

MARTÍNEZ et al. utilizaram a termografia de infravermelhos na inspeção visual em zonas de difícil acesso. Através deste estudo, conseguiram identificar a presença de humidade identificando áreas de menor temperatura na imagem térmica resultantes do arrefecimento local por evaporação da água naquela área e, identificar a presença de fissuras através das elevadas temperaturas localizadas nas extremidades da fissura [20].

2.1.6.3. Diferencial de temperatura (Delta-T)

O delta-T define-se como a diferença de temperatura da área com defeito menos a temperatura da área sem defeito e é utilizado em estudos de análise quantitativa como critério para identificar a anomalia [21]. O delta-T é calculado de acordo com a equação 2.6.

$$\Delta T = T_d(t) - T_{sd}(t) \quad (2.6)$$

Em que:

ΔT	Variação da temperatura (°C);
$T_d(t)$	Temperatura de área com defeito no tempo t (°C);
$T_{sd}(t)$	Temperatura de área sem defeito no tempo t (°C).

MALDAGUE afirma que um delta-T de 2°C já poderá corresponder a possíveis anomalias, ao passo que um delta-T de 4°C já é um forte indício de um comportamento anormal na superfície em estudo [23].

FREITAS et al., apresentaram os resultados da sua pesquisa através da utilização da termografia de infravermelhos na análise de fachadas revestidas com argamassa e pintadas para a identificação de fissuras. Utilizando o parâmetro delta-T obtêm-se valores entre 0,1 e 5° C. Concluíram que o melhor período para se realizar as inspeções é em estação seca e no horário da tarde, a partir das 15 horas [18].

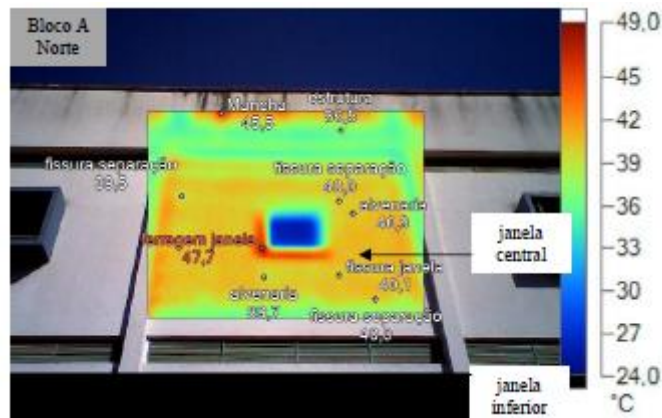


Figura 2.6 – Termografia da fachada norte do Bloco A às 15h durante o período seco, em que se demonstra os pontos utilizados no calculo do delta-T (adaptado de [18]).

2.1.6.4. Função de contraste

A função de contraste é utilizada na termografia ativa como uma ferramenta auxiliar na identificação de anomalias. Nos materiais e elementos de construção pretende-se que a função de contraste possa ser aplicada na determinação do período ótimo para a identificação da anomalia [24]. Existem duas abordagens para a obtenção da função de contraste, nomeadamente, a função “Thermal Contrast” proposta por MALDAGUE e a função “Thermal Running Contrast” proposta por VAVILOV [24, 25].

Segundo MALDAGUE, a função de contraste “Thermal Contrast” (TC) é calculada de acordo com a equação 2.7. Aplicando esta equação verifica-se que TC é a variação de temperatura na área da anomalia em relação à evolução da temperatura da região próxima, sem anomalia [25].

$$TC = \frac{Td(t) - Td(t_0)}{Tsd(t) - Tsd(t_0)} \quad (2.7)$$

Em que:

TC	“Thermal Contrast” (-);
Td(t)	Temperatura de área com defeito no tempo t (°C);
Td(t0)	Temperatura de área com defeito no tempo t0 (°C);
Tsd(t)	Temperatura de área sem defeito no tempo t (°C);
Tsd(t0)	Temperatura de área com defeito no tempo t0 (°C);
T0	Tempo inicial (minutos).

VAVILOV sugere a “Thermal Running Contrast” (TRC), calculada de acordo com a equação 2.8. Através desta equação o autor pretende identificar quais os períodos que melhor identificam as

anomalias, para tal, os valores são calculados para cada período de tempo, correspondendo à relação entre o delta-T e a temperatura média da superfície [24].

$$TRC = \frac{Td(t) - Tnd(t)}{Ta(t) - Ta(t_0)} \quad (2.8)$$

Em que:

TRC	“Thermal Runnig Contrast” (-);
Td(t)	Temperatura de área com defeito no tempo t (°C);
Tnd(t ₀)	Temperatura de área sem defeito no tempo t (°C);
Ta(t)	Temperatura média da superfície no tempo t (°C);
Ta(t ₀)	Temperatura média da superfície no tempo inicial t ₀ (°C);
T ₀	Tempo inicial (minutos).

2.2. ESTUDOS REALIZADOS POR OUTROS AUTORES (TERMOGRAFIA VS HUMIDADE)

2.2.1. “OPTIMAL THERMOGRAPHIC PROCEDURES FOR MOISTURE ANALYSIS IN BUILDING MATERIALS” (1991)

Em 1991 ROSINA e LUDWIG apresentaram os resultados da sua pesquisa que consistia na utilização da termografia passiva e ativa para visualizar e identificar a presença de humidade. Através de análises laboratoriais analisaram a relação entre a temperatura e o fluxo de evaporação para zonas com diferentes percentagens de humidade. E através de ensaios de campo analisaram problemas de humidade em quatro edifícios das cidades de Bergamo e Milão. Desta forma, concluíram que para os dois métodos é possível mapear áreas húmidas, e que as zonas de alto risco de degradação podem ser identificadas através da existência de um fluxo elevado de evaporação [16].

2.2.2. “APPLICATION OF INFRARED THERMOGRAPHY TECHNIQUE IN BUILDING FINISH EVALUATION” (2000)

Em 2000 LI et al., utilizaram a termografia de infravermelhos na deteção de ladrilhos cerâmicos descolados em fachadas de edifícios, com o intuito de identificar anomalias relacionadas com infiltrações de humidade. Concluíram que esta técnica pode ser utilizada como técnica de diagnóstico para detetar defeitos graves que ocorrem por baixo da superfície do ladrilho cerâmico e que a área de descolagem com humidade ou água líquida apresenta uma temperatura superficial mais baixa comparativamente à área de descolagem preenchida por ar, isto durante a fase transitória de aquecimento ou vice-versa, durante a fase transitória de arrefecimento [29].

2.2.3. “TRABALHOS DESENVOLVIDOS PELO LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL (2002 - 2007)

Em 2002, 2003 e 2007 SANTOS e MATIAS utilizaram a termografia para visualização da absorção capilar e da secagem de um provete de betão celular autoclavado, de um provete de tijolo cerâmico vazado, de uma parede de alvenaria de blocos de betão de argila expandida e morete de pedra. Concluíram que após o final da imersão parcial do provete/parede a ascensão capilar era visível na superfície e a presença e distribuição da água líquida no seu interior era nitidamente identificada pela análise termográfica. Na fase de secagem, verificaram que com a diminuição gradual da água líquida existente no provete/parede existia um decréscimo das heterogeneidades térmicas da superfície em análise, ou seja, a diminuição do teor de água líquida diminuía a capacidade de identificação da humidade através da análise termográfica. Verificaram também que as diferentes propriedades de absorção/difusão de água do betão celular autoclavado e da argamassa das juntas do provete de alvenaria influenciavam o valor de humidade relativa no interior do provete, ou seja, na fase de imersão parcial o crescimento acentuado da humidade relativa no interior do provete de alvenaria iniciou-se muito mais tarde do que no provete de betão. No entanto, esta situação inverteu-se na fase de secagem, em que no provete de alvenaria a diminuição gradual de humidade relativa é mais rápida do que no betão [30 – 33].

2.2.4. “PASSIVE INFRARED THERMOGRAPHY – A QUALITATIVE METHOD FOR DETECTING MOISTURE ANOMALIES IN BUILDING ENVELOPES” (2006)

Em 2006 KOMINSKY et al., utilizando a termografia de infravermelhos, identificaram sete locais da envolvente de um edifício com problemas de humidade. Através da inspeção intrusiva verificaram que naqueles locais os níveis de humidade eram superiores a 20 %. De acordo com os resultados obtidos, os autores concluíram que a termografia infravermelha qualitativa em conjunto com uma inspeção visual e uma comparação quantitativa (utilizando medidores de humidade) é um método eficaz para detetar problemas de humidade na envolvente dos edifícios [34].

2.2.5. “AVALIAÇÃO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO USANDO TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS” (2007)

Em 2007 BARREIRA E FREITAS, através da termografia de infravermelhos procederam ao estudo do processo de molhagem e secagem dum provete de betão celular autoclavado. De acordo com os resultados obtidos, os autores concluíram que a emissividade influencia as medições termográficas podendo restringir a aplicação desta técnica ao diagnóstico de edifícios, que esta técnica é limitada à determinação da humidade superficial. Concluíram também que o reconhecimento das áreas molhadas e secas só é possível devido à diferença de temperatura que resultavam da evaporação na superfície molhada e que esta técnica só pode se aplicada quando existe uma diferença de temperatura significativa entre a superfície a medir e o ambiente [35].

2.2.6. "PASSIVE THERMOGRAPHIC DETECTION OF MOISTURE PROBLEMS IN FAÇADES WITH ADHERED CERAMIC CLADDING" (2014)

Em 2014 EDIS et al, apresentaram os resultados de um estudo que avaliava as potencialidades da termografia para a deteção de problemas de humidade em fachadas com revestimento cerâmico aderente. Concluíram que o vidro do ladrilho cerâmico tinha influência nos resultados termográficos, bem como a hora do dia em que se efetuavam as medições. Verificaram que os ensaios efetuados a fachadas com cerâmico não vidro e vidro deviam ser feitos à noite ou no meio da noite, porque a magnitude de diferença de temperatura embora menor mantém-se mais estável e durante mais tempo, em vez da parte da manhã ou meio-dia. Observaram também que as áreas húmidas são observadas nos termogramas como áreas mais frias e que a existência de eflorescência causa perturbações nas medições efetuadas através da termografia de infravermelhos [15].

2.2.7. "CRITERIA FOR APPLICATION AND IDENTIFICATION OF ANOMALIES ON THE FACADES OF BUILDINGS WITH THE USE OF PASSIVE INFRARED THERMOGRAPHY" (2015)

Em 2015 BAUER et al., apresentaram os resultados de um estudo em que a deteção de defeitos em placas de argamassa era baseada na determinação do delta-T e das funções de contraste. Foram criados defeitos em placas com sistemas de revestimentos cerâmicos e revestimentos de argamassa, tais como, ausência de material na argamassa e fissuras superficiais. Verificaram que através do delta-T e das funções de contraste foi possível identificar os diferentes defeitos criados. Verificaram também que era possível quantificar as funções de contraste nos defeitos que foram estudados, particularmente no ciclo de aquecimento e que através deste tipo de análise era possível definir o melhor momento para a identificação dos defeitos [17].

3

ANÁLISE QUALITATIVA DE RESULTADOS

3.1. NOTA INTRODUTÓRIA







A componente prática deste trabalho incide na análise termográfica das heterogeneidades térmicas criadas por fenómenos evaporativos posteriores à absorção por capilaridade. O equipamento de termografia deteta a diferenças de temperaturas resultantes da mudança de estado associada à evaporação, que é uma reação endotérmica e, por isso, implica um arrefecimento na superfície do elemento [30 - 33]. Para tal, procedeu-se a quatro tipos de ensaios:

- Visualização da absorção por capilaridade seguida de secagem de provetes de pedra granítica, betão, betão celular autoclavado, madeira, tijolo cerâmico furado e maciço, sem utilização de fonte de calor (Tipo I);
- Visualização da absorção por capilaridade seguida de secagem de provetes de pedra granítica, betão, betão celular autoclavado, madeira, tijolo cerâmico furado e maciço, com utilização de fonte de calor (Tipo II);
- Visualização da fissuração interna e externa através de embebição pelo topo de provetes de betão e madeira, com utilização de fonte de calor (Tipo III);
- Visualização da fissuração interna e externa através da utilização de uma fonte de calor em provetes de betão e madeira (Tipo IV);

Na realização deste estudo utilizaram-se provetes prismáticos dos materiais acima referidos e procedeu-se a uma análise qualitativa dos termogramas para visualizar as diferenças de temperaturas nas superfícies em estudo, resultantes da presença de humidade.

No quadro 3.1 indicam-se as características dos provetes utilizados e as propriedades dos materiais que os constituem. No quadro 3.2 encontram-se descritas as características dos ensaios e as suas referências.

Quadro 3.1 - Características e propriedades dos provetes utilizados [37 - 39]

						
Materiais	Pedra Granítica	Madeira	Tijolo Maciço	Tijolo Cerâmico	Bloco de Betão	Betão Celular Autoclavado
REF	G	M	TM	TF	BB	BC
Dimensão (cm*cm*cm)	10*10*20	7*7*20	11*6*22	19*15*29	15*15*15	7*7*20
Emissividade	0,85	0,90	0,90	0,93	0,93	0,85
Densidade seca (kg.m⁻³)	2600 a 3000	400	1800 a 2100	1100 a 1400	2200	430 a 800
Porosidade (m³.m⁻³)	-	0,8	0,25	0,11	0,15	0,7

Quadro 3.2 - Descrição dos ensaios e as suas referências

Ref.	Material	Impermeabilização	Fissuração
BB1	Betão	Não	Não
BB2	Betão	Sim (3 faces - laterais)	Não
BB3	Betão	Sim (4 faces - laterais e topo)	Não
BB4	Betão	Não	Sim
TF1	Tijolo Furado	Não	Não
BC1	Betão Celular Autoclavado	Não	Não
BC3	Betão Celular Autoclavado	Sim (4 faces - laterais e topo)	Não
G1	Pedra de Granito	Não	Não
G3	Pedra de Granito	Sim (4 faces - laterais e topo)	Não
TM1	Tijolo Maciço	Não	Não
TM3	Tijolo Maciço	Sim (4 faces - laterais e topo)	Não
M1	Madeira	Não	Não
M3	Madeira	Sim (4 faces - laterais e topo)	Não
M4	Madeira	Não	Sim
M5	Madeira	Sim (4 faces - laterais e topo)	Sim
M6	Madeira	Não	Sim (Fissuras internas)

3.2. O EQUIPAMENTO DO LABORATÓRIO DE FÍSICA DAS CONSTRUÇÕES – LFC

3.2.1. THERMO TRACER TH9100 MR

A câmara termográfica utilizada na presente dissertação foi a Thermo Tracer TH9100 MR [36], da NEC Avio Infrared Technologies Co., Ltd (figura 3.1). A câmara termográfica permite efetuar a medição das temperaturas superficiais de um objeto ou superfície captando a radiação emitida pelo objeto, e fazendo a conversão para uma imagem térmica colorida ou monocromática possível de visualizar no ecrã LCD. A utilização da câmara é simples, sendo possível executar a maioria dos comandos usando apenas os botões da consola. O *software* e opções da câmara são controlados através de um sistema de menus, que são operados através dos botões da consola. As imagens registadas podem ser guardadas na memória interna da câmara, e trabalhadas em tempo real através do *software* da câmara, ou com recurso a um computador portátil utilizando o programa InfReC Analyzer NS9500 Lite [36].

O anexo A indica as características do equipamento existente no Laboratório de Física das Construções – LFC.



Figura 3.1 - Thermo Tracer TH9100 MR

3.2.2. PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO DA CÂMARA

Para se obterem termogramas fiáveis é essencial que, antes do início do ensaio, se desliguem todas as fontes de calor e se desviem todos os objetos que possam interferir nos resultados devido às reflexões. Deve também proceder-se à calibração da câmara termográfica [12,36].

A câmara Thermo Tracer TH9100 MR permite vários tipos de calibrações, no entanto, as fundamentais são:

- “Ref Cal”, que permite uma calibração em relação às reflexões do ambiente onde se insere o objeto em estudo. Deve-se ter em atenção que este tipo de calibração só poderá ser feito dez minutos após se ter ligado a câmara [36].
- *Ambient Compensation*, esta compensação só se utiliza para análises quantitativas. É necessário fornecer a temperatura atmosférica, a humidade relativa e a distância da câmara ao objeto (figura 3.2) [36].



Figura 3.2 – Equipamento utilizado na medição da temperatura e humidade relativa

- *BackGround Compensation*, permite a compensação do erro que resulta da radiação emitida pelo fundo. Para tal, começa-se por determinar a temperatura refletida, com base no procedimento descrito em ASTM E1862-97. Para isso, deve-se cortar uma porção de folha de alumínio com dimensões na ordem dos 25 x 30 cm (figura 3.3). Esta porção deve ser amarrotada e de seguida alisada e fixada com fita – cola à superfície da amostra em estudo. Deve-se colocar a câmara sensivelmente a 50 cm da folha de alumínio e perpendicular a esta, de forma a incluir toda a área. A medição da temperatura

correspondente à folha de alumínio deverá ser efetuada considerando uma emissividade de 1. A temperatura refletida corresponde à média das temperaturas obtidas para uma porção da folha de alumínio. Deve-se ter em atenção que para efetuar este procedimento não pode haver a incidência de raios solares de forma direta na folha de alumínio (no caso de não haver sombra natural deve-se criar sombra artificial) [36].

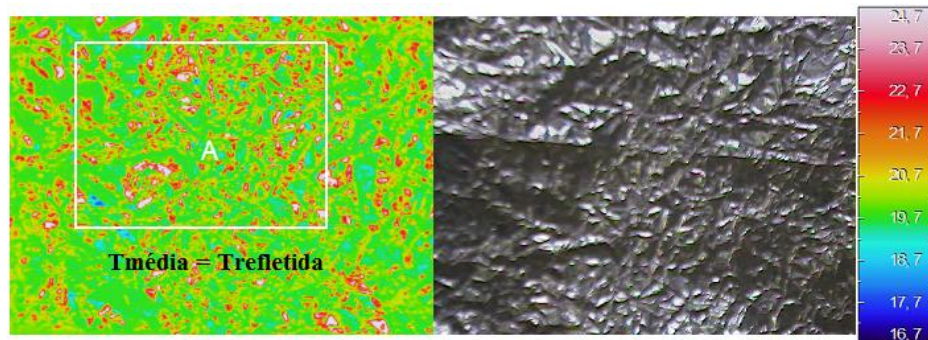


Figura 3.3 - Diferentes fases para determinar a temperatura refletida de uma amostra

3.3. ENSAIO TIPO I

3.3.1. PROCEDIMENTOS DO ENSAIO

No ensaio tipo I utiliza-se a termografia para visualização da absorção por capilaridade seguida de secagem de provetes de pedra granítica, betão, betão celular autoclavado, madeira, tijolo cerâmico furado e maciço, sem utilização de fonte de calor. Para além de uma análise qualitativa dos termogramas foi também efetuada uma avaliação da variação da massa e da ascensão capilar visualmente detetada.

Antes de iniciar o ensaio, procedeu-se à marcação no chão do local exato da colocação do tripé da câmara termográfica (figura 3.4), uma vez que o ensaio foi efetuado por etapas. Para cada etapa, foi também medido o valor da temperatura e da humidade relativa do meio ambiente e procedeu-se à calibração da câmara termográfica de acordo com o procedimento descrito em § 3.2.2. Para a focagem das imagens térmicas foi necessário utilizar um perfil metálico, que aparece em todos os termogramas as temperaturas mais elevadas.



Figura 3.4 - Local de montagem do ensaio

O procedimento de ensaio consistiu em:

- Tirar um termograma ao provete;
- Pesar o provete em equilíbrio higrotérmico com a envolvente;
- Colocar o provete parcialmente imerso, entre 5mm a 10 mm da base;
- Nas primeiras duas horas tirar termogramas seguidos de pesagem de 30 em 30 minutos e posteriormente alargar o período de medição até ao final da fase de embebição;
- No final da fase de embebição, retirar o provete do contacto com a água, iniciando-se a fase de secagem;
- Nas primeiras duas horas tirar termogramas seguidos de pesagem de 30 em 30 minutos e posteriormente alargar o período de medição;
- Duração do ensaio de cerca de 9 dias.

Os termogramas obtidos ao longo do ensaio são apresentados no anexo B.

Quadro 3.3 - Valores da temperatura, humidade relativa e temperatura refletida obtidos ao longo do ensaio Tipo I

		Período (horas)	Temperatura (°C)	Humidade Relativa (%)	Temperatura Refletida (°C)
1 º Dia (07/05/2015)	1 º Medição (09:00)	Embebição – 100 horas e 30 minutos	21,3	55,8	20,6
	2 º Medição (13:00)		22,1	55,7	21,7
2 º Dia (08/05/2015)	1 º Medição (10:00)		22,3	66,3	21,4
	2 º Medição (12:00)		22,4	64,0	22,6
	3 º Medição (14:00)		22,6	69,8	21,4
	4 º Medição (16:00)		22,4	69,3	22,4
3 º Dia (11/05/2015)	1 º Medição (13:00)		22,4	62,9	22,2
3 º Dia (11/05/2015)	1 º Medição (13:00)	Secagem – 92 horas	22,4	62,9	22,2
4 º Dia (12/05/2015)	1 º Medição (10:00)		23,3	62,4	22,5
	2 º Medição (12:00)		23,6	64,5	23,6
	3 º Medição (14:00)		23,7	68,1	23,7
	4 º Medição (16:00)		24,2	62,6	24,2
5 º Dia (13/05/2015)	1 º Medição (09:00)		24,1	60,4	23,3
6 º Dia (14/05/2015)	1 º Medição (09:00)		23,8	63,1	23,5

7. ^o Dia (15/05/2015)	1. ^o Medição (09:00)		23,6	45,6	22,4

3.3.2. RESULTADOS OBTIDOS

3.3.2.1. Betão

Os gráficos das figuras 3.5 e 3.6 mostram a variação da massa e da ascensão capilar em função do tempo, para os provetes de betão.

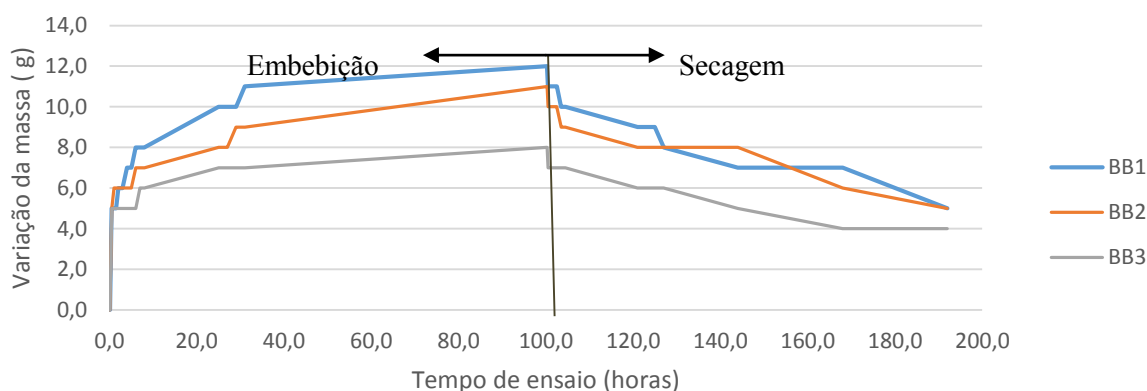


Figura 3.5 – Variação da massa ao longo do ensaio dos provetes BB1, BB2 e BB3

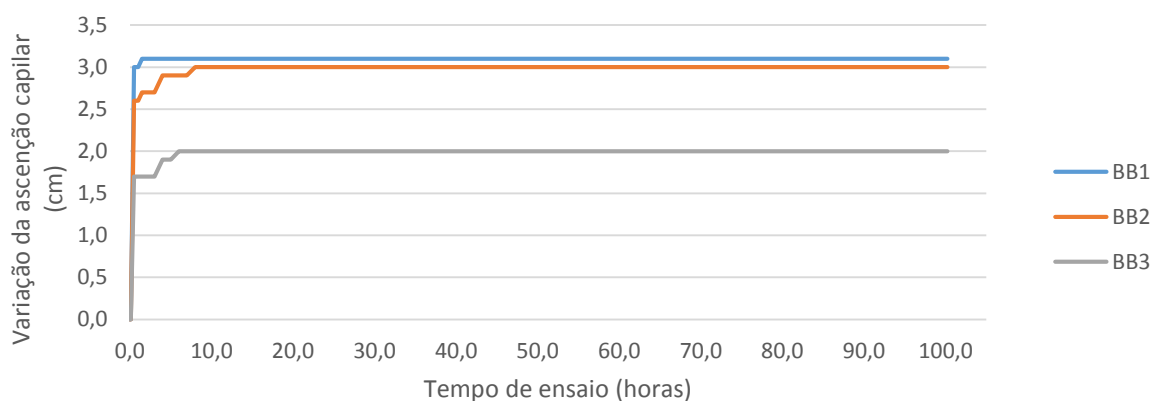


Figura 3.6 - Variação da ascensão capilar ao longo do ensaio do provete BB1, BB2 e BB3

Da análise do gráfico da figura 3.5 é possível verificar que em média a variação da massa é mais evidente até às 31 horas. A partir desse tempo de ensaio a curva torna-se mais suave até ao fim da fase de embebição. Na fase de secagem, a variação acentuada da massa continuou a verificar-se até ao final do ensaio, exceto para o provete BB3 que parece ter estabilizado às 168 horas.

Da análise do gráfico da figura 3.6 é possível verificar que em média a ascensão capilar visível é mais evidente até às 2 horas, a partir desse tempo de ensaio a curva torna-se mais suave, mantendo-se praticamente constante até ao fim da fase de embebição.

O termograma dos provetes BB1, BB2 e BB3 (figura 3.7) foi efetuado quando os provetes se encontravam em condições de equilíbrio com o ambiente e antes de serem colocados em contacto com a água, estando portanto secos. Mais uma vez se refere que a área mais quente corresponde a um perfil metálico que permitiu a focagem da imagem térmica e que nada tem a ver com os provetes.

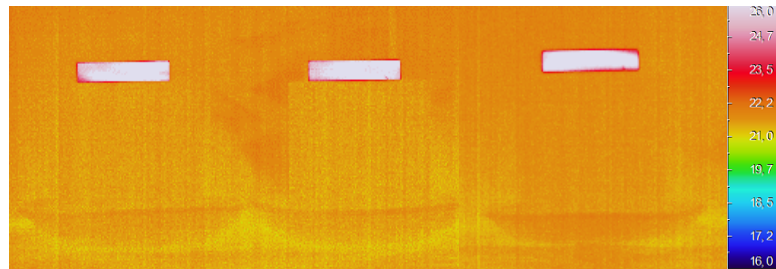


Figura 3.7 – Termograma dos provetes BB1.01, BB2.01 e BB3.01 (secos)

Os termogramas BB1. 02 a BB1.17, BB2.02 a BB2.17 e BB3.02 a BB3.17 (anexo B) mostram as variações de temperatura superficial dos provetes de betão ao longo do período de embebição. O nível de água nos provetes é detetado visualmente e através da escala de cor nas imagens térmicas, embora nestas últimas a presença da água não seja muito evidente (figura 3.8). Através da análise do termograma é possível verificar que, na fase final da embebição, a diferença de temperaturas entre a zona molhada e a zona seca do provete BB1 é aproximadamente 1,6 °C, do provete BB2 é aproximadamente 1,6 °C, do provete BB3 é aproximadamente 1,2°C.

Os resultados dos termogramas são coerentes com os resultados das pesagens e da ascensão capilar visível, uma vez que mostram uma zona mais fria, correspondente a uma evaporação mais acentuada, semelhante para os provetes BB1 e BB2 e menor para o provete BB3.

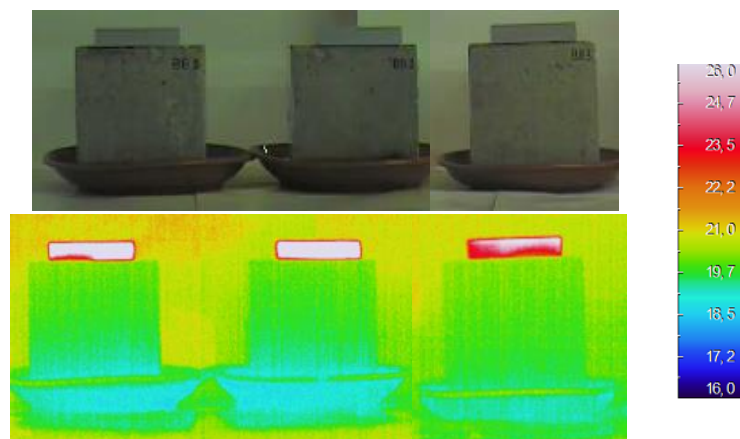


Figura 3.8 – Nível da água detetado no provete BB1.17, BB2.17 e BB3.17, visualmente e na imagem térmica, às 100:20 horas (final da fase de embebição)

Os provetes BB1, BB2, BB3 foram retirados do contacto com a água às 100h20, tempo total da fase de embebição, iniciando-se o processo de secagem. Os termogramas BB1.18 a BB1.31, BB2.18 a BB2.31 e BB3.18 a BB3.31 (anexo B) mostram as variações de temperatura superficial do provete BB1, em média cerca de 0,9 °C, do provete BB2, em média cerca de 0,8 °C e, do provete BB3, em média cerca de 0,5 °C. Com o passar do tempo a zona mais fria vai desaparecer, correspondem à isotérmica azul. As isotérmicas laranjas aumentam consideravelmente, o que revela uma maior velocidade de secagem em todo o provete.

Já no final do processo de secagem (tempo de ensaio= 192h00), verifica-se que a temperatura no provete se aproxima da temperatura ambiente, o que provoca uma homogeneização da imagem térmica, e por sua vez, torna-se mais difícil a deteção de água no interior dos provetes. Contudo, os resultados da pesagem mostram que, mesmo no final do ensaio, a secagem continua a decorrer de uma forma igualmente intensa, pelo menos para os provetes BB1 e BB2, o que permite afirmar que a termografia não consegue detetar fluxos menores de humidade.

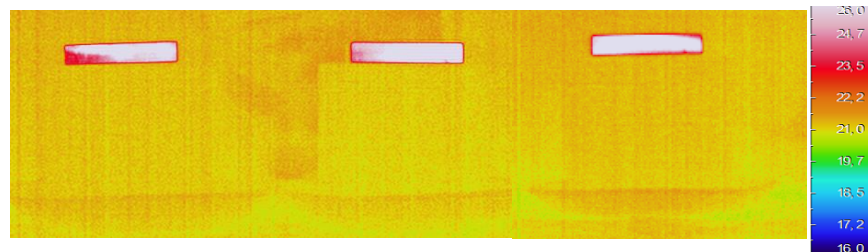


Figura 3.9 – Final da fase de secagem dos provetes BB1.31, BB2.31 e BB3.31 (tempo de ensaio= 192h00)

3.3.2.2. Betão Celular Autoclavado

Os gráficos das figuras 3.10 e 3.11 mostram a variação da massa e a ascensão capilar em função do tempo, para os provetes de betão celular autoclavado.

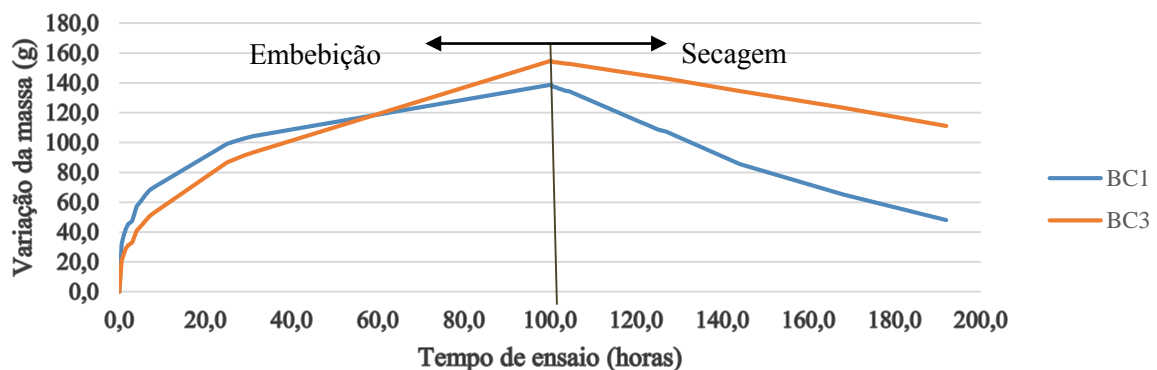


Figura 3.10 - Variação da massa ao longo do ensaio dos provetes BC1 e BC3

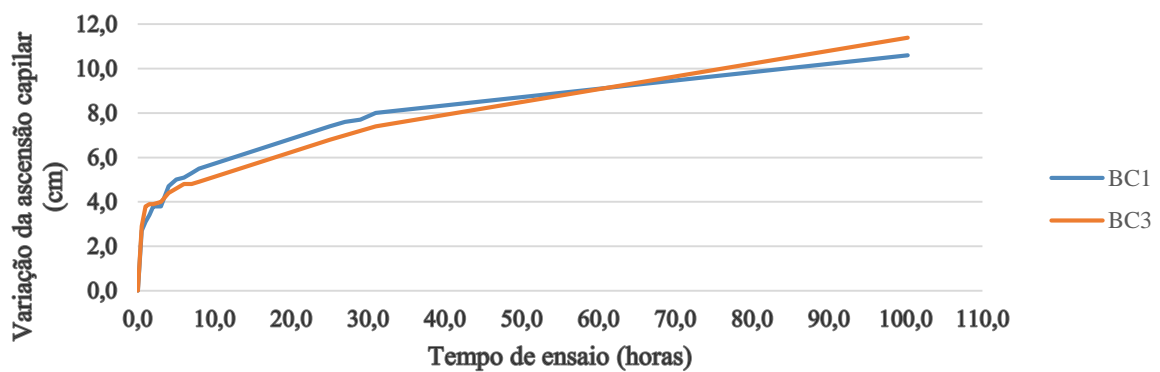


Figura 3.11 – Variação da ascensão capilar ao longo do ensaio dos provetes BC1 e BC3

Da análise do gráfico da figura 3.10 é possível verificar que em média a variação da massa é mais evidente até às 27 horas, a partir desse tempo de ensaio o declive da curva torna-se mais suave até ao fim da fase de embebição. Na fase de secagem, a variação da massa é linear ao longo de todo o período de ensaio, não tendo estabilizado, o que demonstra que a secagem ainda decorria quando se terminou o ensaio. Verifica-se que nas primeiras 60 horas a embebição é mais acentuada no provete não impermeabilizado (BC1), passando depois a ser o provete impermeabilizado (BC3) a ter um aumento mais acentuado da massa. Este facto pode estar relacionado com a maior facilidade de secagem do provete não impermeabilizado. Na fase de secagem, a diminuição da massa é mais acentuada no provete não impermeabilizado (BC1), como seria de esperar.

Da análise do gráfico da figura 3.11 é possível verificar que em média a ascensão capilar visível é mais evidente até às 8 horas e que a partir desse tempo de ensaio o declive da curva torna-se mais suave até ao fim da fase de embebição. Tal como se verificou na variação da massa, também na ascensão capilar visível se nota uma inversão da tendência cerca das 60 horas, passando o provete BC3 a mostrar um nível de ascensão capilar mais elevado.

O termograma dos provetes BC1 e BC3 (figura 3.12) foi efetuado quando os provetes se encontravam em condições de equilíbrio com o ambiente e antes de serem colocados em contacto com a água, encontrando-se secos.

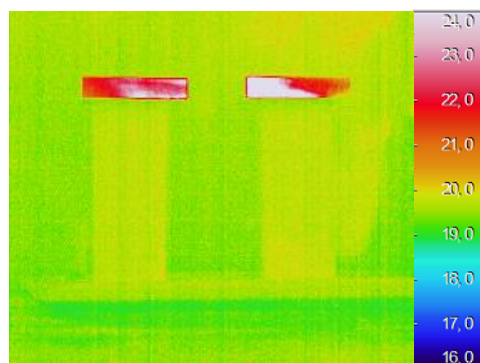


Figura 3.12 – Termograma dos provetes BC1.01 e BC3.01 (secos)

Os termogramas BC1.02 a BC1.17 e BC3.02 a BC3.17 (anexo B) mostram as variações de temperatura superficial dos provetes de betão celular autoclavado ao longo do período de embebição. O nível de

água nos provetes é detetado visualmente e através da escala de cor nas imagens térmicas (figura 3.13). Através da análise do termograma é possível verificar que, na fase final da embebição, a diferença de temperatura entre a zona molhada e a zona seca do provete BC1 é aproximadamente 4,4 °C e do provete BC3 é aproximadamente 3,4 °C [31]. Os termogramas apontam para resultados coerentes com as medições da massa e da ascensão capilar visível. Particularmente é possível verificar que no final da embebição (figura 3.13), a área correspondente à zona mais fria é maior no provete impermeabilizado.

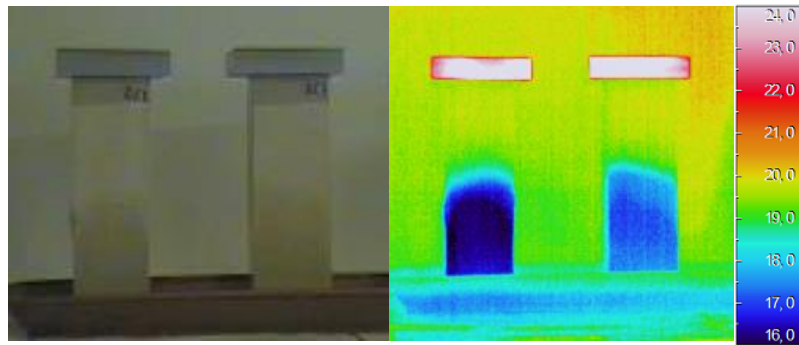


Figura 3.13 – Nível da água detetado no provete BC1.17, visualmente e na imagem térmica, às 100:20 horas (final da fase de embebição)

Os provetes BC1, BC3 foram retirados do contacto com a água às 100h20, iniciando-se o processo de secagem. Os termogramas BC1.18 a BC1.31 e BC3.18 a BC3.31 (anexo B) mostram variações de temperatura superficial do provete BC1 de aproximadamente 3 °C e do provete BC3 de 4 °C. O facto de a diferença de temperatura entre a zona seca e a zona molhada ser maior na fase de secagem do que na fase de embebição pode estar relacionado com a quantidade de água considerável que está contida, ainda conter muita água no interior do provete, ter parte das suas faces impermeabilizadas o que restringe a secagem nessas faces. Com o passar do tempo a zona mais fria vai diminuindo e as isotérmicas verdes e amarelas aumentam consideravelmente, o que revela uma maior velocidade de secagem na parte superior do provete.

No final do ensaio (tempo de ensaio= 192h00), os provetes ainda continham alguma água, o que fica demonstrado pelas heterogeneidades dos termogramas.

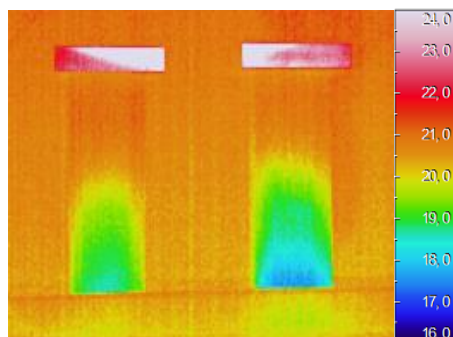


Figura 3.14 - Final da fase de secagem do provete BC1.31 e BC3.31 (tempo de ensaio= 192h00)

3.3.2.3. Madeira

Os seguintes gráficos das figuras 3.15 e 3.16 mostram a variação da massa e da ascensão capilar em função do tempo dos provetes de madeira.

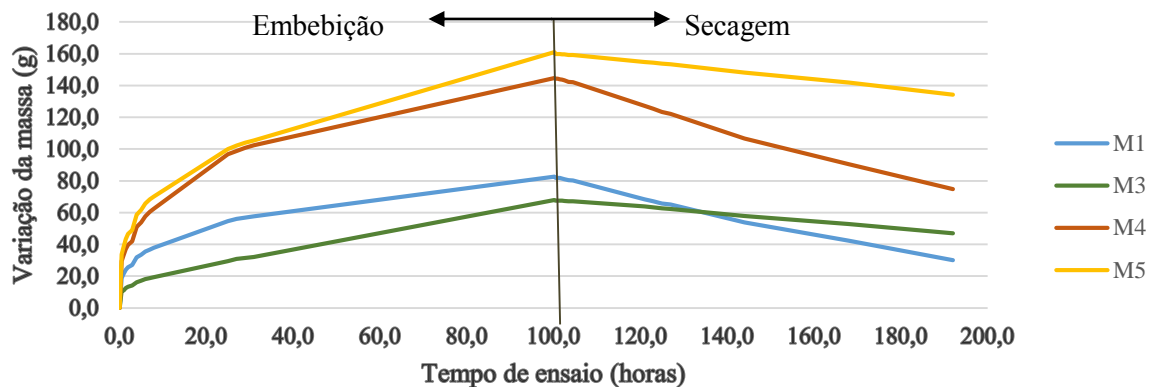


Figura 3.15– Variação da massa ao longo do ensaio dos provetes M1, M3, M4 e M5

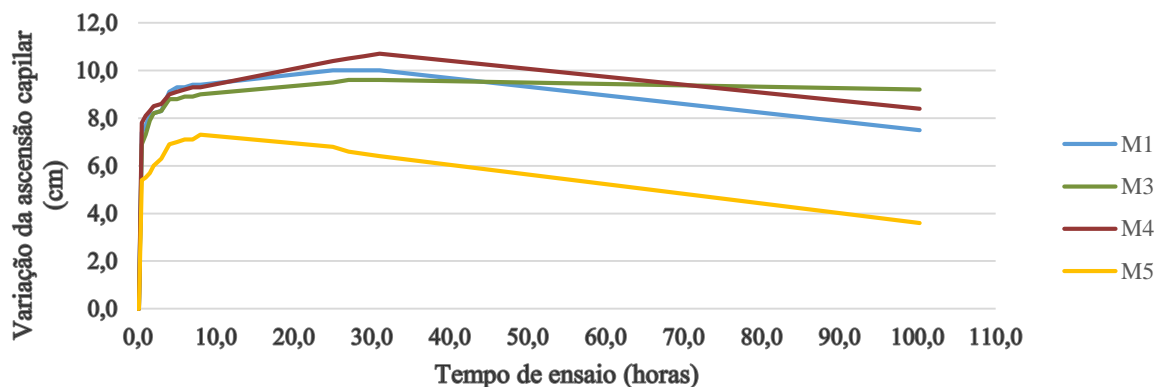


Figura 3.16 – Variação da ascensão capilar ao longo do ensaio dos provetes M1, M3, M4 e M5

Da análise do gráfico da figura 3.15 é possível verificar que de uma maneira geral a variação da massa é mais evidente até às 25 horas, a partir das quais o declive da curva torna-se mais suave até ao fim da fase de embebição. Na fase de secagem, a variação da massa é linear ao longo do tempo de ensaio. Verifica-se que a presença das fissuras alteram o comportamento do material face à humidade. Com efeito, na fase de embebição, no provete fissurado o efeito da impermeabilização das faces parece ser menos evidente no que no provete não fissurado, uma vez que a quantidade de água absorvida não sofre uma atenuação. Por outro lado, a intensidade de secagem, apesar de menor no provete impermeabilizado, continua a ser bastante acentuada, quando comparada com o provete impermeabilizado sem fissuras.

Da análise do gráfico da figura 3.16 é possível verificar que a ascensão capilar visível é mais evidente até às 12 horas, a partir das quais o declive da curva torna-se mais suave até ao fim da fase de embebição. Verifica-se um ligeiro decréscimo na ascensão capilar em todos os provetes, o que pode resultar das propriedades específicas da madeira.

O termograma dos provetes M1, M3, M4 e M5 (figura 3.17) foi efetuado quando os provetes se encontravam em condições de equilíbrio com o ambiente e antes de serem colocados em contacto com a água, encontrando-se por isso secos.

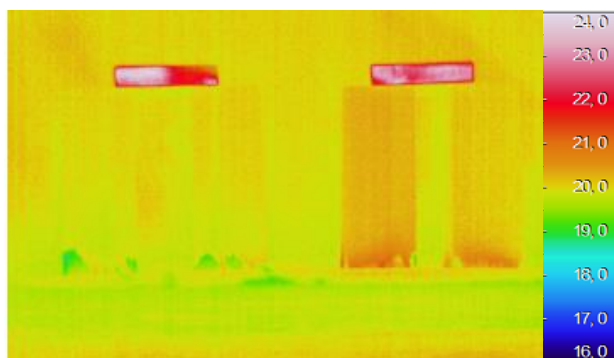


Figura 3.17– Termograma dos provetes M1.01, M3.01, M4.01 e M5.01 (secos)

Os termogramas M1.02 a M1.17, M3.02 a M3.17, M4.02 a M4.17 e M5.02 a M5.17 (anexo B) mostram as variações de temperatura superficial dos provetes de madeira ao longo do período de embebição. O nível de água nos provetes é detetado visualmente e através da variação de cor nas imagens térmicas (figura 3.18). Através da análise dos termogramas é possível verificar que, na fase final da embebição, a diferença de temperatura entre a zona molhada e a zona seca do provete M1 é aproximadamente 4,3 °C, do provete M3 é aproximadamente 3,5 °C, do provete M4 é aproximadamente 4,3 °C e do provete M5 é aproximadamente 3,5 °C. Verifica-se também alguma irregularidade na forma como ocorre a ascensão capilar detetada através da termografia, sobretudo nos provetes não fissurados, o que evidencia as características anisotrópicas da madeira. No termograma do provete M5 a mancha mais fria, correspondente à zona molhada, é menor do que nos restantes provetes, o que está de acordo com a variação do nível de ascensão capilar visível (figura 3.16). No entanto, comparando com os resultados da figura 3.12 pode afirmar-se que a embebição está a ocorrer através das fissuras internas do provete.

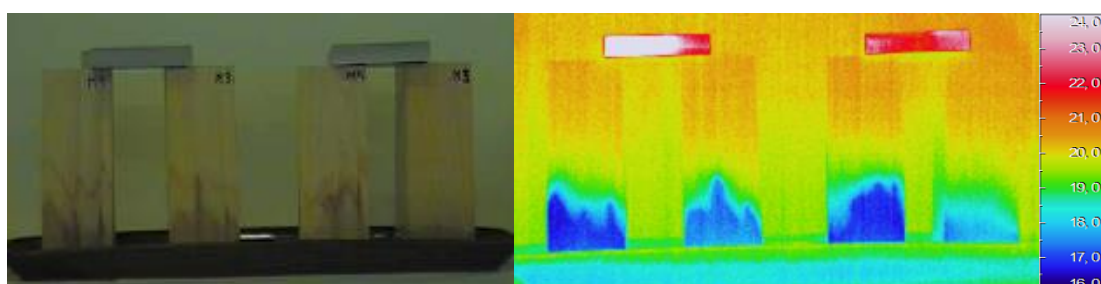


Figura 3.18 – Nível da água detetado no provete M1.17, M3.17, M4.17 e M5.17, visualmente e na imagem térmica, às 100:20 horas (final da fase de embebição)

Os provetes M1, M3, M4 e M5 foram retirados do contacto com a água às 100h20, iniciando-se o processo de secagem. Os termogramas M1.18 a M1.31, M3.18 a M3.31, M4.18 a M4.31 e M3.18 a M3.31 (anexo B) mostram que as variações da temperatura superficial entre a zona molhada e não molhada no provete M1 são de 2,7 °C, no provete M3 são de 2,7 °C, no provete M4 são de 2,7 °C e no provete M5 são de 2,3 °C. Tal como no betão celular (§ 3.2.1.2), também na madeira o processo de secagem ainda continuava a decorrer quando se terminou o ensaio às 192h00 (figura 3.19).

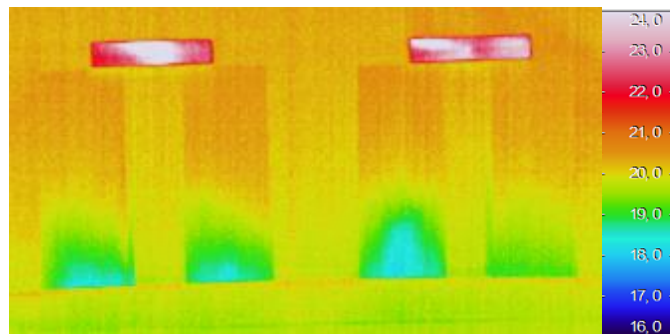


Figura 3.19 – Final da fase de secagem do provete M1.31, M3.31, M4.31 e M5.31 (tempo de ensaio= 192h00)

3.3.2.4. Pedra Granítica

Os gráficos das figuras 3.20 e 3.21 mostram a variação da massa e da ascensão capilar em função do tempo dos provetes de pedra granítica.

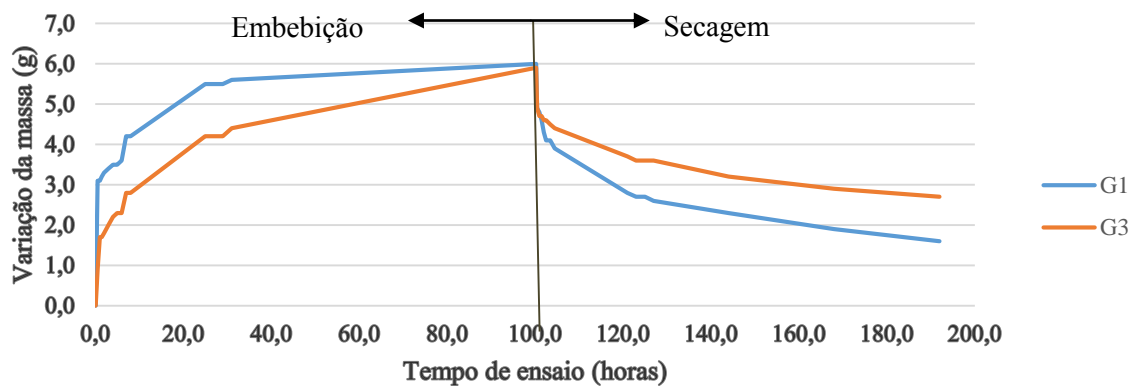


Figura 3.20 – Variação da massa ao longo do ensaio dos provetes G1 e G3

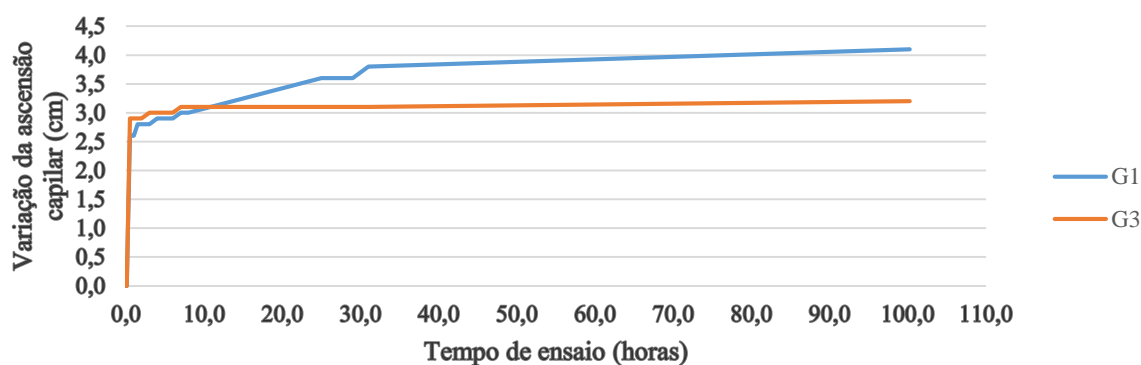


Figura 3.21 – Variação da ascensão capilar ao longo dos provetes G1 e G3

Da análise do gráfico da figura 3.20 é possível verificar que a variação da massa é mais evidente até às 5 horas e que a partir dessa altura o declive da curva torna-se mais suave até ao fim da fase de embebição. No granito, o efeito da impermeabilização é muito evidente nesta fase, uma vez que no provete não impermeabilizado (G1) o aumento da massa já é pouco relevante a partir das 35 horas, ao contrário do que acontece no provete impermeabilizado (G3). Na fase de secagem, a variação da massa é mais acentuada no início atenuando-se com o decorrer do ensaio. Também na secagem a impermeabilização tem um efeito considerável.

Da análise do gráfico da figura 3.21 é possível verificar que em média a ascensão capilar visível é mais evidente até à primeira hora de ensaio e que a partir desse período o declive da curva torna-se mais suave até ao fim da fase de embebição. No caso do provete impermeabilizado, o nível visível da ascensão capilar parece ter mesmo estabilizado a partir das 10h00.

O termograma dos provetes G1 e G3 (figura 3.22) foi efetuado quando os provetes se encontravam em condições de equilíbrio com o ambiente e antes de serem colocados em contacto com a água, encontrando-se secos.

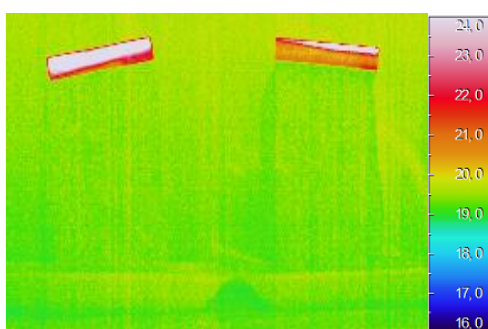


Figura 3.22 – Termograma dos provetes G1.01 e G3.01 (secos)

Os termogramas G1.02 a G1.17 e G3.02 a G3.17 (anexo B) mostram as variações de temperatura superficial dos provetes de pedra granítica ao longo do período de embebição. O nível de água nos provetes é detetado visualmente e através da escala de cor nas imagens térmicas, embora, tal como nos provetes de betão, não seja fácil detetar a presença de água (figura 3.23). Através da análise dos termogramas é possível verificar que, na fase final da embebição, a diferença de temperatura entre a

zona molhada e a zona seca do provete G1 é aproximadamente 1,9 °C, do provete G3 é aproximadamente 1,7 °C.

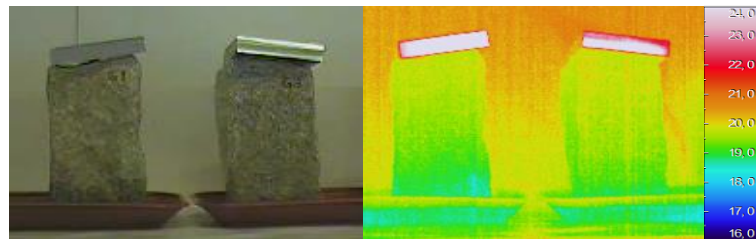


Figura 3.23 – Nível da água detetado no provete G1.017 e G3.17, visualmente e na imagem térmica, às 100:20 horas (final da fase de embebição)

Os provetes G1, G3 foram retirados do contacto com a água às 100h20, iniciando-se o processo de secagem. Os termogramas G1.18 a G1.31, G3.18 a G3.31, (anexo B) mostram as variações de temperatura superficial dos provetes G1 e G3, sendo que a diferença de temperatura entre a zona seca e molhada nos dois provetes é de cerca de 1 °C. No final do processo de secagem (figura 3.24) é impossível verificar através dos termogramas que o processo de secagem ainda decorre, como mostra a figura 3.20.

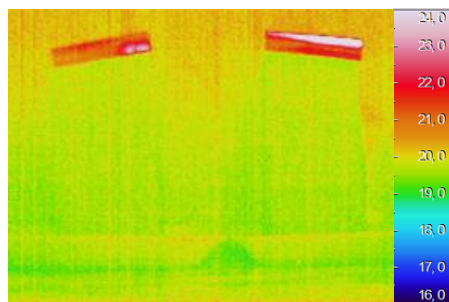


Figura 3.24 – Final da fase de secagem do provete G1.31 e G3.31 (tempo de ensaio= 192h00)

3.3.2.5. Tijolo Cerâmico Furado

Os gráficos das figuras 3.25 e 3.26 mostram a variação da massa e da ascensão capilar em função do tempo do provete de tijolo cerâmico furado.

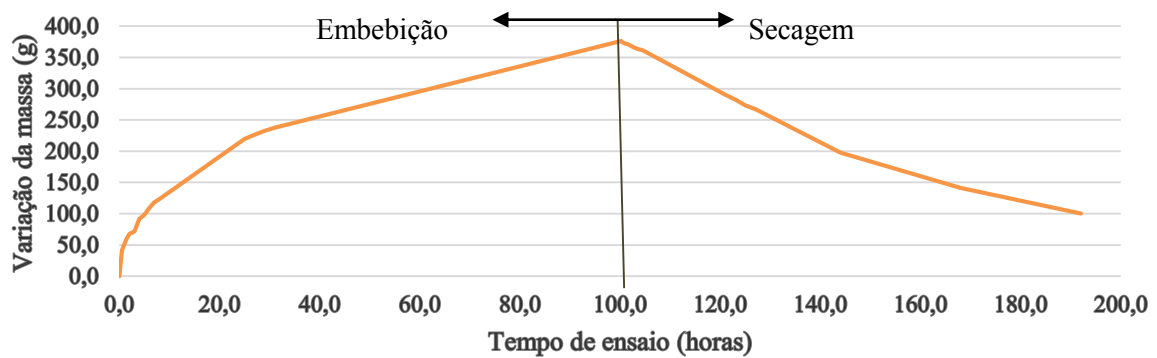


Figura 3.25 – Variação da massa ao longo do ensaio do provete TF1

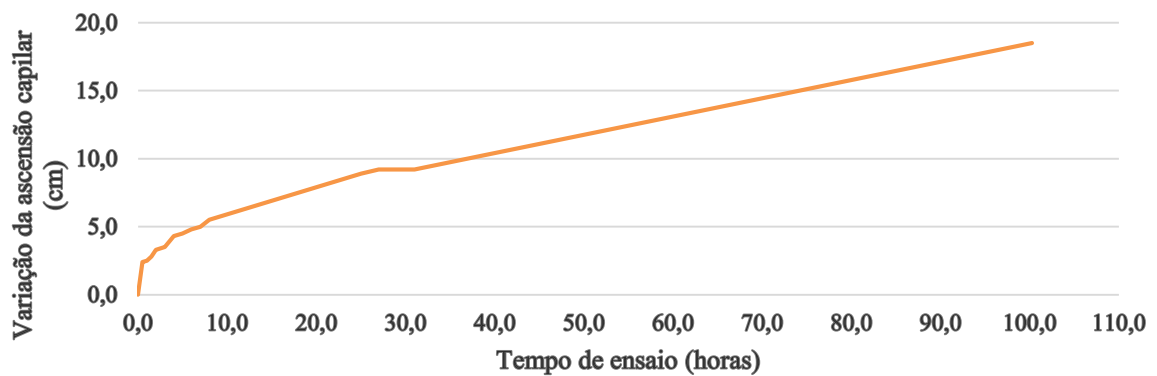


Figura 3.26 – Variação da ascensão capilar ao longo do ensaio do provete TF1

Da análise do gráfico da figura 3.25 é possível verificar que em média a variação da massa é mais evidente até às 8 horas e que a partir desse período o declive da curva torna-se mais suave até ao fim da fase de embebição. Na fase de secagem, a variação da massa é mais acentuada até às 140 horas, atenuando-se ligeiramente até ao final do ensaio.

Da análise do gráfico da figura 3.26, é possível verificar que a ascensão capilar visível é mais evidente até às 5 horas.

O termograma TF1 (figura 3.27) foi efetuado quando o provete se encontrava em condições de equilíbrio com o ambiente e antes de ser colocados em contacto com a água, encontrando-se seco.

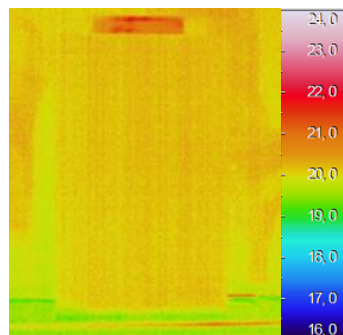


Figura 3.27 – Termograma dos provetes TF1.01 (secos)

Os termogramas TF1.02 a TF1.17 (anexo B) mostram as variações de temperatura superficial do provete de tijolo cerâmico furado ao longo do período de embebição. O nível de água no provete é detetado visualmente e através da escala de cor nas imagens térmicas (figura 3.28). Através da análise dos termogramas é possível verificar que a diferença de temperatura entre a zona molhada e a zona seca do provete TF1 é aproximadamente 3,5 °C.

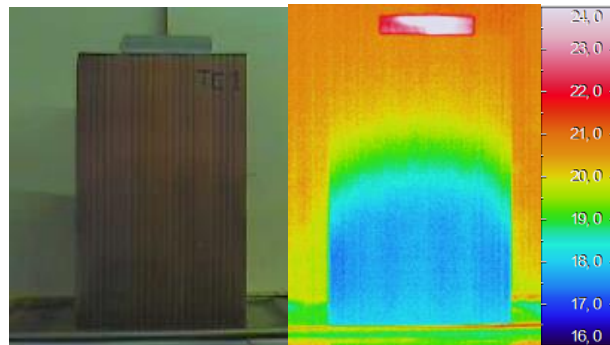


Figura 3.28 – Nível da água detetado no provete TF1.17, visualmente e na imagem térmica, às 100:20 horas (final da fase de embebição)

O provete TF foi retirado do contacto com a água às 100h20, iniciando-se o processo de secagem. Os termogramas TF1.18 a TF1.31 (anexo B) mostraram as variações de temperatura superficial do provete TF1 que são próximas de 1,6 °C, entre a zona molhada e a zona seca. No final do ensaio (192h00), ainda era possível observar algumas heterogeneidades no termograma (figura 3.29) correspondentes à presença de humidade.

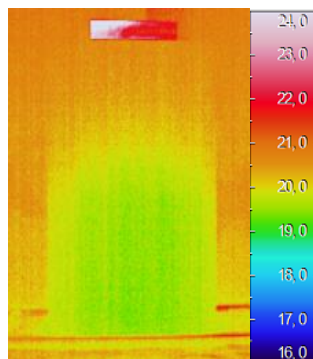


Figura 3.29 – Final da fase de secagem do provete TF1.31 (tempo de ensaio= 192h00)

3.3.2.6. Tijolo Cerâmico Maciço

As figuras 3.30 e 3.31 mostram a variação da massa e da ascensão capilar em função do tempo dos provetes de tijolo maciço.

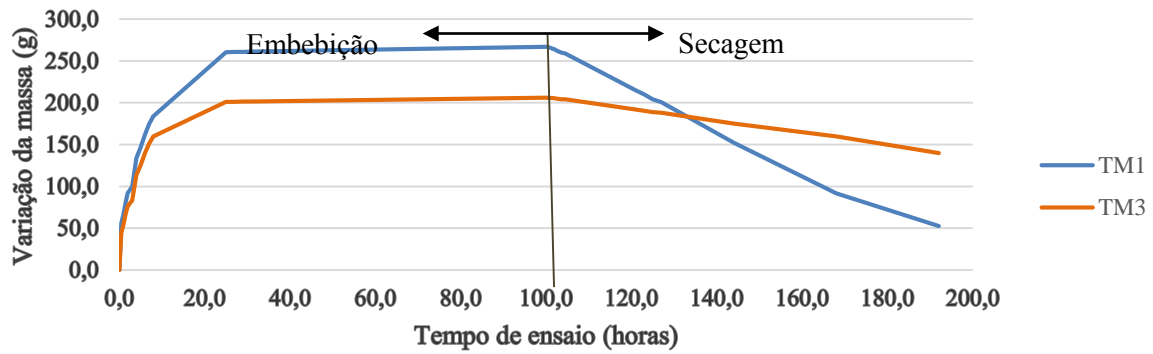


Figura 3.30 – Variação da massa ao longo do ensaio dos provetes TM1 e TM3

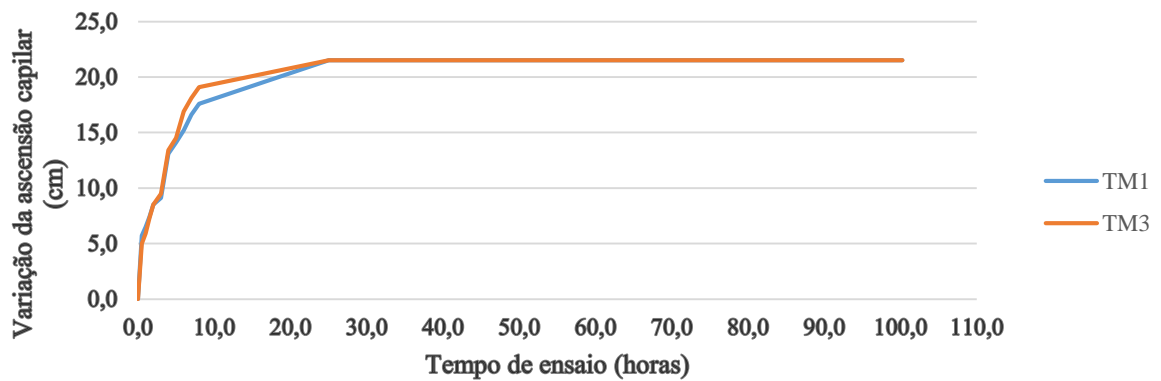


Figura 3.31 – Variação da ascensão capilar ao longo dos provetes TM1 e TM3

Da análise do gráfico da figura 3.30, é possível verificar que a variação da massa é mais evidente até às 8 horas, a partir das quais o declive da curva torna-se mais suave até ao fim da fase de embebição. O aumento de massa é praticamente nulo a partir das 25 horas, quer para o provete não impermeabilizado quer para o impermeabilizado, embora neste último a variação da massa seja menor. Na fase de secagem, a variação da massa é praticamente linear para os dois provetes, embora seja muito mais acentuada para o provete não impermeabilizado.

Da análise do gráfico da figura 3.31, é possível verificar que em média a ascensão capilar visível é mais evidente até às 8 horas.

O termograma dos provetes TM1 e TM3 (figura 3.32) foi efetuado quando os provetes se encontravam em condições de equilíbrio com o ambiente e antes de serem colocados em contacto com a água, encontrando-se secos.

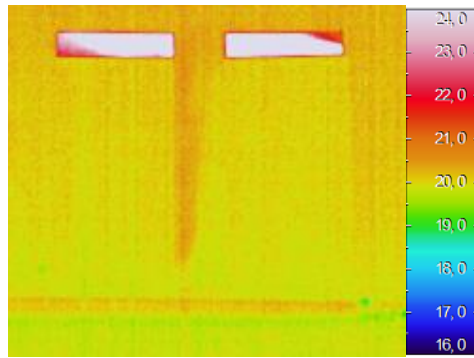


Figura 3.32 – Termograma dos provetes TM1.01 e TM3.01 (secos)

Os termogramas TM1.02 a TM1.17 e TM1.02 a TM1.17 (anexo B) demonstram as variações de temperatura superficial dos provetes de tijolo cerâmico maciço ao longo do período de embebição. O nível de água nos provetes é detetado visualmente e através da escala de cor nas imagens térmicas. Na figura 3.33 já não se detetam heterogeneidades significativas nos termogramas uma vez que a frente húmida já tinha atingido a face superior dos provetes.

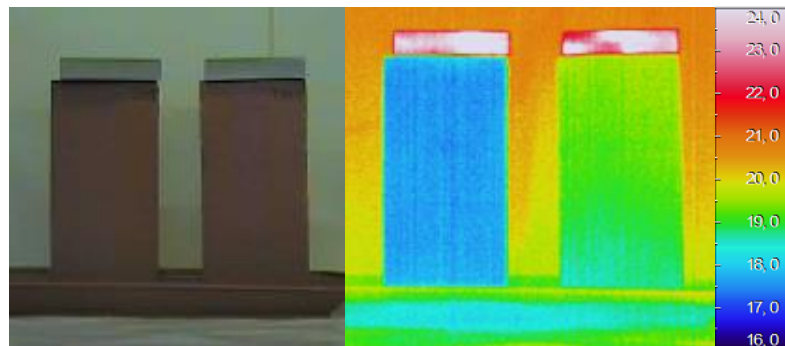


Figura 3.33 – Nível da água detetado nos provetes TM1.017 e TM3.017, visualmente e na imagem térmica, às 100:20 horas (final da fase de embebição)

O provete TM foi retirado do contacto com a água às 100h20, iniciando-se o processo de secagem. Os termogramas TM1.18 a TM1.31 e TM3.18 a TM3.31 (anexo B) mostram as variações de temperatura superficial dos provetes TM1 e TM3 e a figura 3.31 mostra o termograma tirado no final da secagem (192h00), onde são difíceis de identificar heterogeneidades apesar de ainda existir humidade nos provetes (figura 3.30).

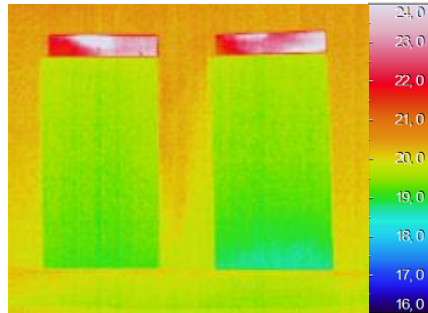


Figura 3.34 – Final da fase de secagem dos provetes TM1.31 e TM3.31 (tempo de ensaio= 192h00)

3.4. ENSAIO TIPO II

3.4.1. PROCEDIMENTOS DO ENSAIO

No ensaio Tipo II utiliza-se a termografia para visualização da absorção por capilaridade seguida do processo de secagem de provetes de pedra granítica, betão, betão celular autoclavado, madeira, tijolo cerâmico furado e tijolo maciço, com utilização de uma fonte de calor, constituída por uma lâmpada de infravermelhos de 2000 W, ligada ao longo de todo o ensaio. Para além de uma análise qualitativa dos termogramas foi também efetuada uma avaliação da variação da massa e da ascensão capilar visualmente detetada. A figura 3.35 mostra a montagem do ensaio. No quadro 3.4 indicam-se os parâmetros necessários para efetuar a calibração da câmara.



Figura 3.35 – Local de montagem do ensaio

Quadro 3.4 - Valores da temperatura, humidade relativa e temperatura refletida obtidos ao longo do ensaio Tipo II

			Período (Horas)	Temperatura (°C)	Humidade Relativa (%)	Temperatura Refletida (°C)
Provetes de: -Betão Celular Autoclavado -Madeira -Granito	1.º Dia (27/04/ 2015)	1.º Medição (9:00)	Embebição – 47 horas e 30 minutos	20,0	66,0	19,4
		2.º Medição (13:00)		21,0	61,0	21,9
	2.º Dia (29/04/ 2015)	3.º Medição (9:00)		21,2	58,1	20,4
	2.º Dia (29/04/ 2015)	1.º Medição (9:00)	Secagem – 7 horas e 30 minutos	21,2	58,1	20,4
		2.º Medição (13:00)		22,8	52,4	23,7
Provetes de: -Betão -Tijolo cerâmico maciço -Tijolo cerâmico furado	1.º Dia (30/04/ 2015)	1.º Medição (9:00)	Embebição – 96 horas	21,3	58,1	20,9
		2.º Medição (13:00)		22,3	58,1	24,0
	2.º Dia (04/05/ 2015)	3.º Medição (9:00)		21,0	70,2	22,8
	2.º Dia (04/05/ 2015)	1.º Medição (9:00)	Secagem – 7 horas e 30 minutos	21,0	70,2	22,8
		2.º Medição (13:00)		21,8	69,2	23,8

O procedimento de ensaio consistiu em:

- Ligar a lâmpada de infravermelhos e deixar aquecer cerca de dez minutos (posicionada à mesma altura do provete e a cerca de 1,10 m do mesmo);
- Tirar um termograma ao provete;
- Pesar o provete em equilíbrio higrotérmico com a envolvente;
- Colocar o provete parcialmente imerso, entre 5mm a 10 mm da base. Efetuar termogramas de 6 em 6 minutos e pesagens de 30 em 30 minutos. A duração da fase de embebição foi de cerca de 48 horas, exceto para os provetes de betão, tijolo furado e tijolo maciço, em que a duração da fase de embebição foi 96 horas;

- No final da fase de embebição, retirar o provete do contacto com a água, iniciando-se a fase de secagem, mantendo a lâmpada de infravermelha ligada;
- Tirar um termograma ao provete;
- Pesar o provete. Efetuar termogramas de 6 em 6 minutos e pesagens de 30 em 30 minutos. A duração deste ensaio ronda as 8 horas.

Os termogramas mais relevantes obtidos ao longo do ensaio são apresentados no anexo B.

3.4.2. RESULTADOS OBTIDOS

3.4.2.1. Betão

Os gráficos das figuras 3.36 e 3.37 mostram a variação da massa e da ascensão capilar em função do tempo dos provetes de betão.

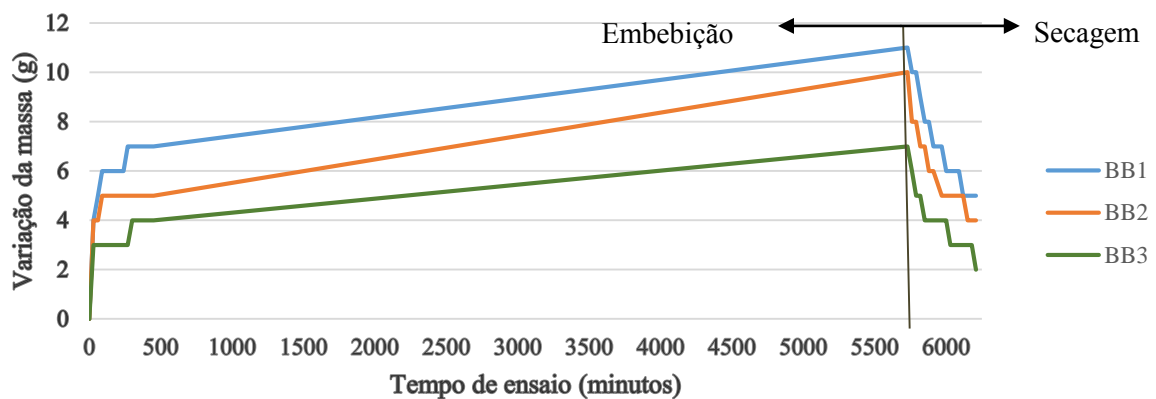


Figura 3.36 – Variação da massa ao longo do ensaio dos provetes BB1, BB2 e BB3

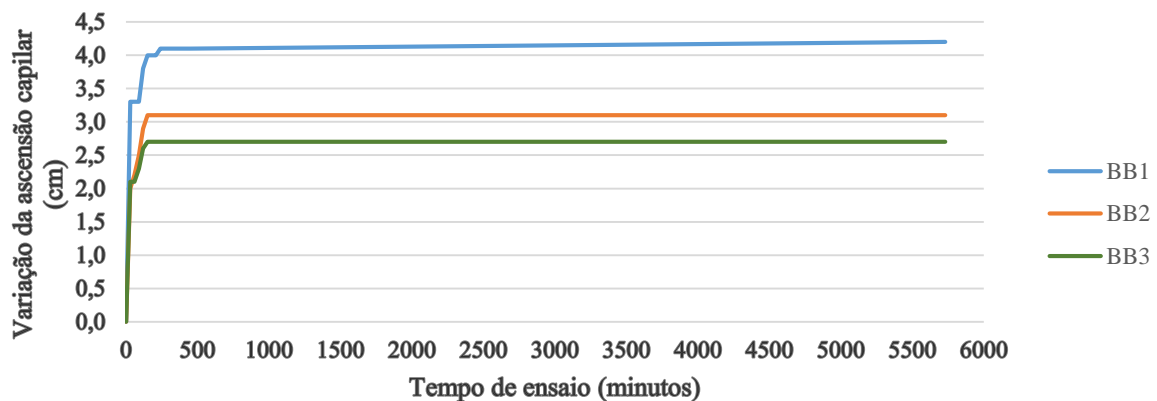


Figura 3.37 – Variação da ascensão capilar ao longo do ensaio do provete BB1

Da análise dos gráficos da figura 3.36, verifica-se que não há grande influência do aquecimento no processo de embebição e secagem do provete de betão (§ 3.3.2.1). Relativamente ao nível visível de ascensão capilar (figura 3.37) as diferenças também não são muito significativas, embora se tenha neste caso atingido um nível mais elevado.

O termograma dos provetes BB1, BB2 e BB3 (figura 3.38) foi efetuado antes dos provetes serem colocados em contacto com a água, após 10 minutos de aquecimento com a lâmpada. A zona mais fria exterior aos provetes corresponde às suas sombras. Notam-se nos provetes algumas heterogeneidades da cor, que podem significar a existência de defeitos.

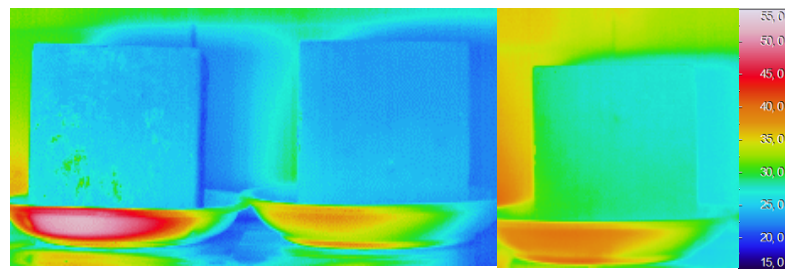


Figura 3.38 – Termograma dos provetes BB1.01, BB2.01 e BB3.01 (secos)

Os termogramas BB1.02 a BB1.68, BB2.02 a BB2.68 e BB3.02 a BB3.68 (anexo B) mostram as variações de temperatura superficial dos provetes de betão ao longo do período de embebição. O nível de água nos provetes é detetado visualmente embora não seja detetado nas imagens térmicas (figura 3.39).

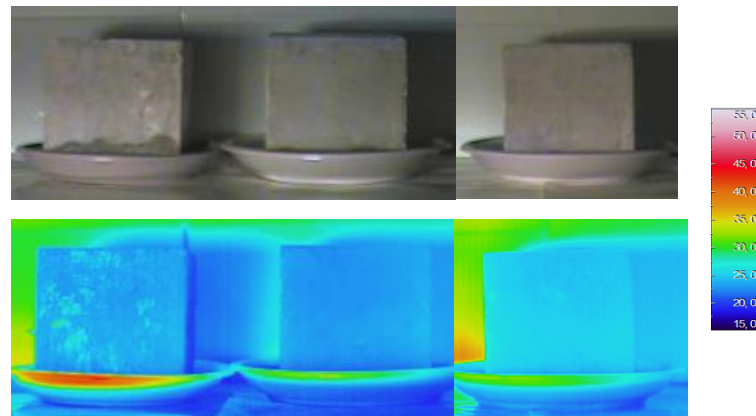


Figura 3.39 – Nível da água detetado nos provetes BB1.68 e BB2.68 visualmente e na imagem térmica, aos 5760 minutos (final da fase de embebição)

Os provetes BB1, BB2, BB3 foram retirados do contacto com a água aos 5760 minutos, iniciando-se o processo de secagem. Os termogramas BB1.69 a BB1.135, BB2.69 a BB2.135 e BB3.69 a BB3.135 (anexo B) mostram as variações de temperatura superficial dos provetes BB1, do provete BB2 e do provete BB3. De referir que os defeitos identificados no provete BB1 pode estar relacionados com destacamentos, uma vez que se identificam sempre como pontos mais quentes durante o aquecimento. Pode também concluir-se que o aquecimento não favoreceu a visualização da humidade existente nos

provetes, uma vez que os termogramas não mostram heterogeneidades relacionadas com a humidade, nem na fase de embebição (figura 3.39) nem na de secagem (figura 3.40).

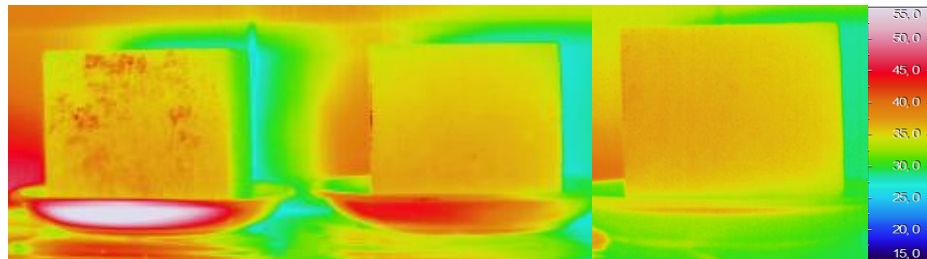


Figura 3.40 – Final da fase de secagem dos provetes BB1.135, BB2.135 e BB3.135 (tempo de ensaio = 6210 minutos)

3.4.2.2. Betão Celular Autoclavado

Os gráficos das figuras 3.41 e 3.42 mostram a variação da massa e da ascensão capilar em função do tempo dos provetes de betão celular autoclavado. Verifica-se que o aquecimento não provocou alterações ao comportamento dos provetes, quando comparados estes resultados com o do § 3.3.2.2.

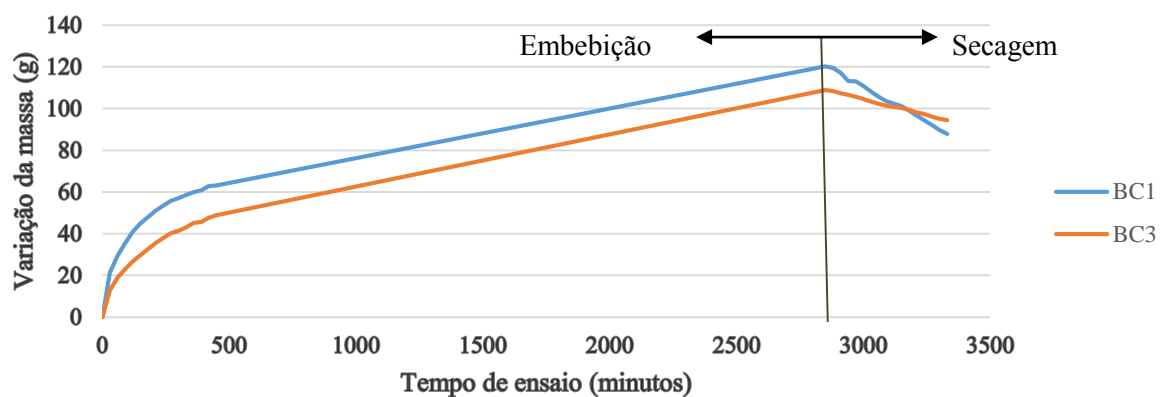


Figura 3.41 – Variação da massa ao longo do ensaio dos provetes BC1 e BC3

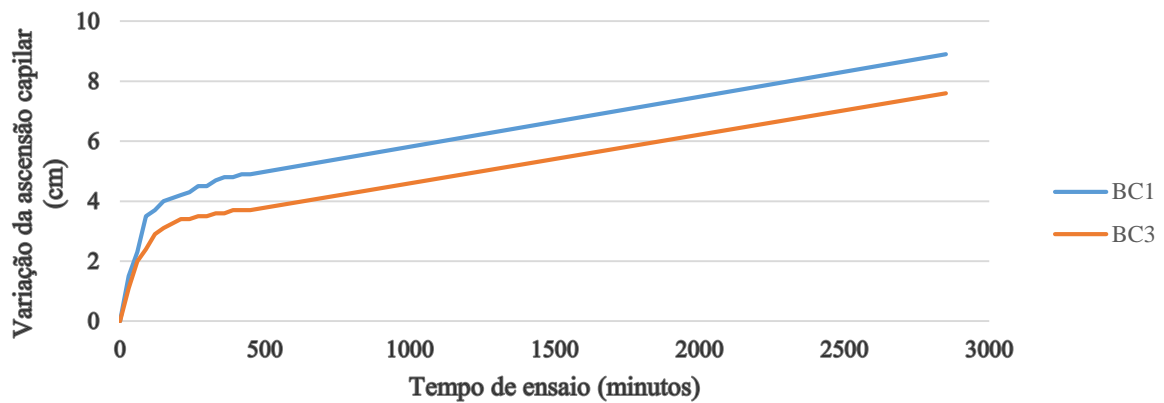


Figura 3.42 – Variação da ascensão capilar ao longo do ensaio dos provetes BC1 e BC3

Ao contrário do que acontece com os provetes de betão, em que o aquecimento parece não trazer qualquer benefício à visualização da humidade através da termografia (§3.3.2.1), no caso dos provetes de betão celular autoclavado, a presença da lâmpada torna mais nítidas a isotérmicas, quer na fase de embebição (figura 3.43) quer na de secagem (figura 3.44). Os termogramas BC1.02 a BC1.135 e BC3.02 a BC3.135, com as variações das temperaturas superficiais dos provetes, são apresentados no anexo B.

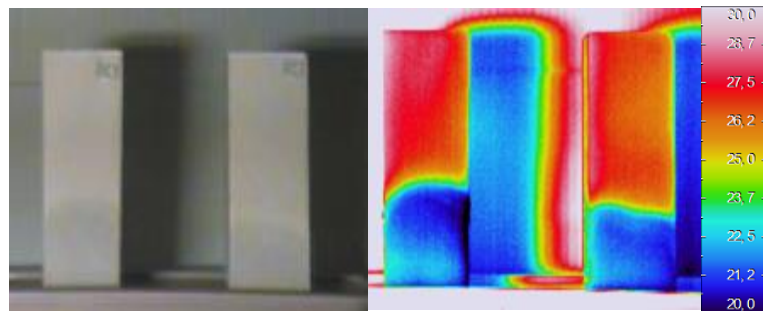


Figura 3.43– Nível da água detetado nos provetes BC1.68 e BC3.68 visualmente e na imagem térmica, aos 2850 minutos (final da fase de embebição)

De constatar que no provete BC3, através da imagem termográfica da figura 3.44, parece ter havido maior secagem da zona molhada, por se encontrar a uma temperatura superior. No entanto, verifica-se, recorrendo à análise de variação de massa (figura 3.41), que este provete está mais húmido que o provete BC1. Este facto pode estar relacionado com a maior dificuldade que a água líquida existente no interior do provete BC3 tem em chegar à superfície da única face não impermeabilizada do provete BC3 (face visível na figura 3.44) que por esse motivo revela uma maior secagem superficial.

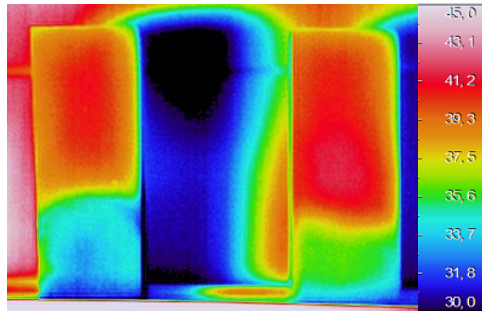


Figura 3.44 – Final da fase de secagem do provete BC1.135 e BC3.135 (tempo de ensaio=3330 minutos)

3.4.2.3. Madeira

Os gráficos das figuras 3.45 e 3.46 demonstram que não existe influência do aquecimento no comportamento dos provetes de madeira, quer em termos de variação da massa quer da ascensão capilar.

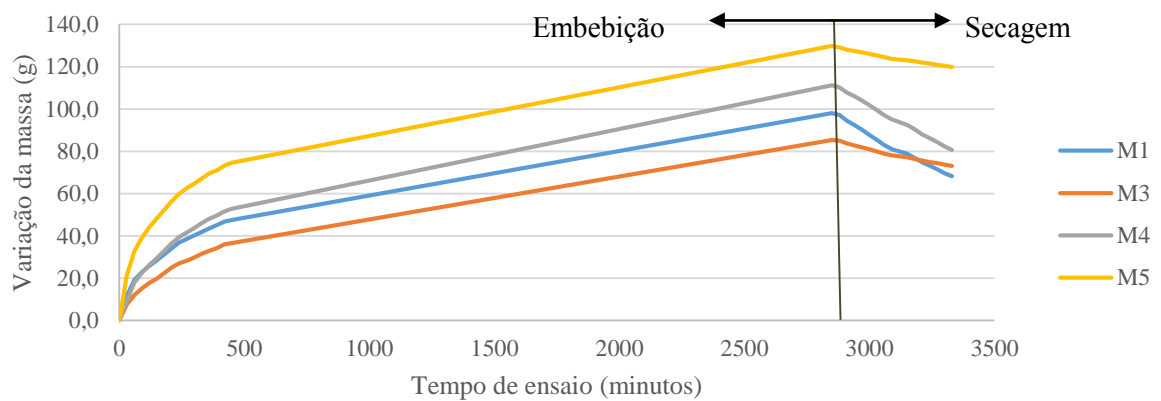


Figura 3.45 – Variação da massa ao longo do ensaio dos provetes M1, M3, M4 e M5

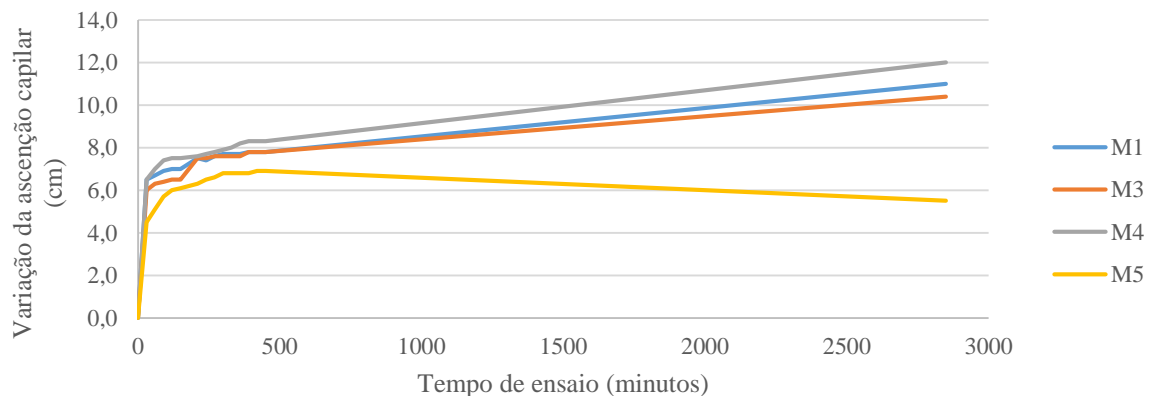


Figura 3.46 – Variação da ascensão capilar ao longo do ensaio dos provetes M1, M3, M4 e M5

Os termogramas M1.02 a M1.135, M3.02 a M3.135 apresentados no anexo B mostram as variações de temperatura superficial dos provetes de madeira ao longo do período de embebição e secagem. O nível de água nos provetes é detetado visualmente e através da escala de cor nas imagens térmicas, quer na fase de embebição (figura 3.47), quer na de secagem (figura 3.48). Nos provetes de madeira o aquecimento pareceu atenuar as variações de temperatura detetadas pela câmara de termografia, quando comparadas as imagens com as do § 3.3.2.3, uma vez que a secagem superficial foi intensificada pelo calor transmitido pela lâmpada. No caso da secagem, o efeito da lâmpada é ainda mais evidente, uma vez que as heterogeneidades nas imagens térmicas são consideravelmente menores.

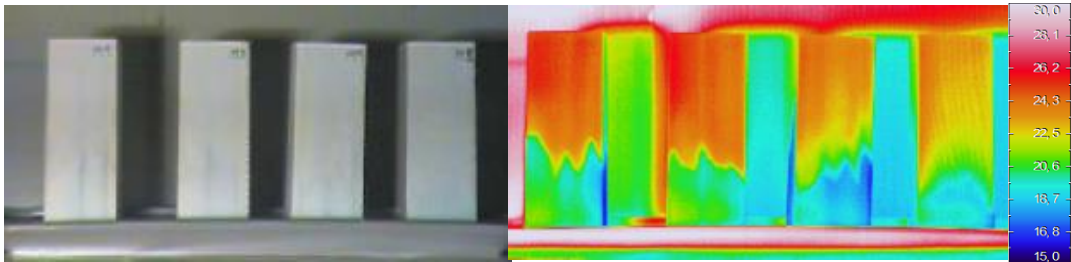


Figura 3.47 – Nível da água detetado nos provetes M1.68, M3.68, M4.68 e M5.68 visualmente e na imagem térmica, aos 2850 minutos (final da fase de embebição)

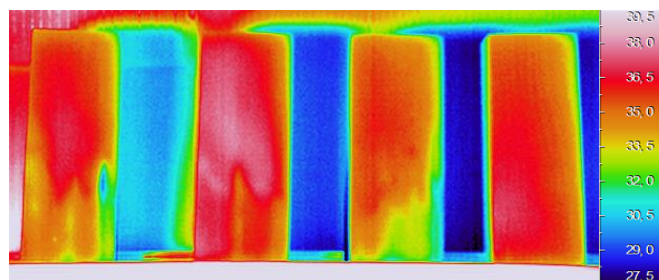


Figura 3.48 – Final da fase de secagem dos provetes M11.135, M3.135, M4.135 e M5.135 (tempo de ensaio=3330 minutos)

3.4.2.4. Pedra Granítica

Os gráficos das figuras 3.49 e 3.50 mostram a variação da massa e da ascensão capilar em função do tempo dos provetes de pedra granítica.

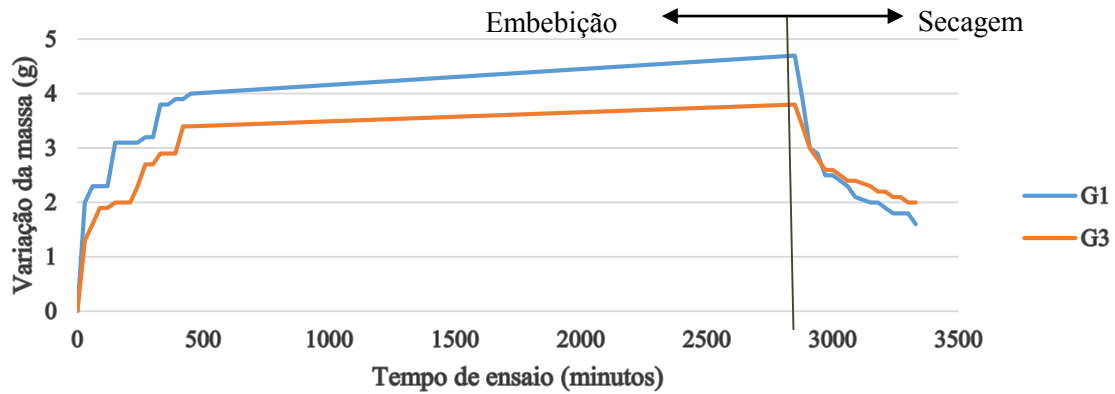


Figura 3.49 – Variação da massa ao longo do ensaio dos provetes G1 e G3

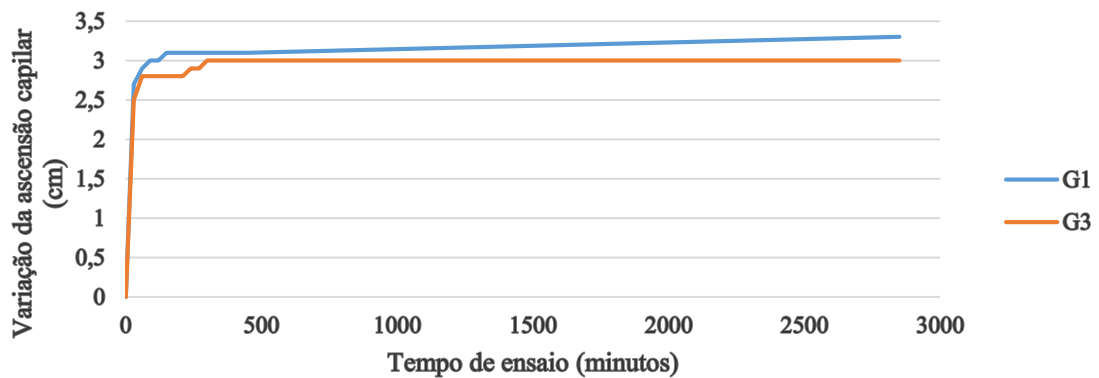


Figura 3.50 – Variação da ascensão capilar ao longo do ensaio dos provetes G1 e G3

Tal como no caso do betão (§ 3.4.2.1), também com o granito o nível de água não é detetado nos termogramas, nem fase de embebição (figura 3.51) nem na de secagem (figura 3.52). As heterogeneidades térmicas detetadas nos termogramas resultam das irregularidades dos provetes e das heterogeneidades características do próprio material. Os termogramas G1.02 a G1.135 e G3.02 a G3.135 são apresentados no anexo B.

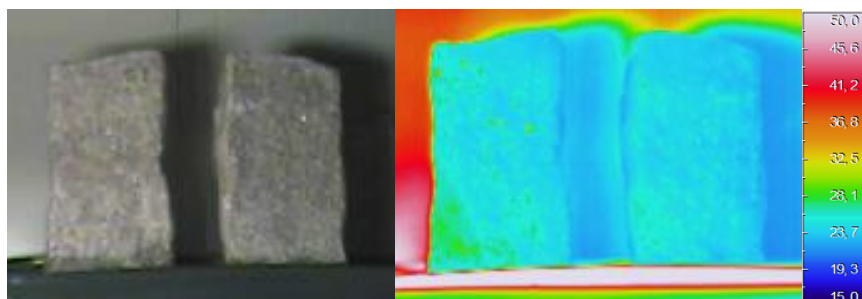


Figura 3.51 – Nível da água detetado nos provetes BC1.68 e BC3.68 visualmente e na imagem térmica, aos 2850 minutos (final da fase de embebição)

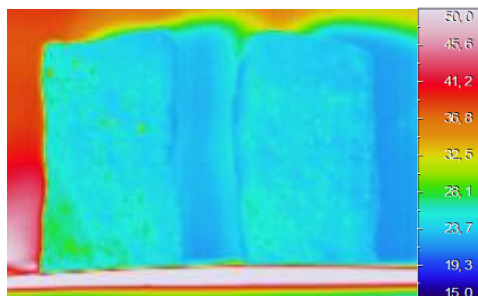


Figura 3.52 – Final da fase de secagem do provete G1.135 e G3.135 (tempo de ensaio=3330 minutos)

3.4.2.5. Tijolo Cerâmico Furado

As figuras 3.53 e 3.54 mostram a variação da massa e da ascensão capilar em função do tempo dos provetes de tijolo cerâmico furado. Não se constatam alterações nos resultados devido à presença da lâmpada de infravermelhos, quando comparados com § 3.3.2.5.

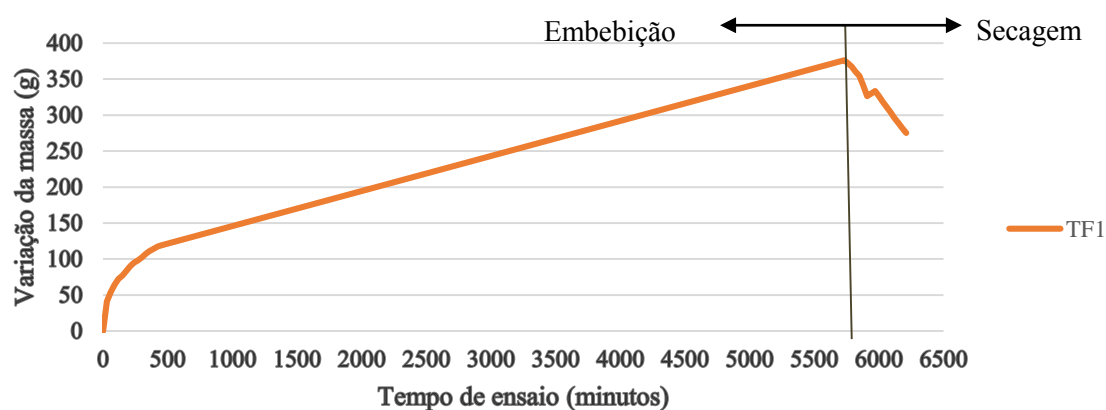


Figura 3.53– Variação da massa ao longo do ensaio do provete TF1

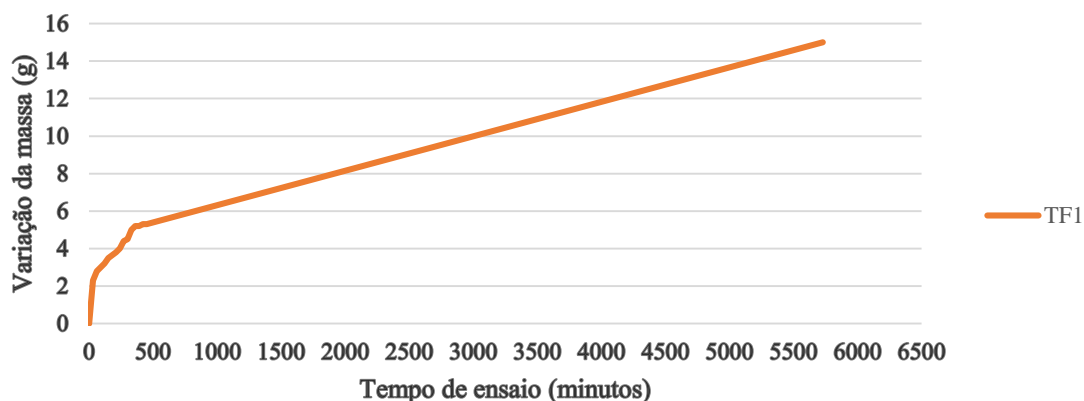


Figura 3.54– Variação da ascensão capilar ao longo do ensaio do provete TF1

Os termogramas TF1.02 a TF1.135 do anexo B mostram as variações de temperatura superficial do provete de tijolo cerâmico furado ao longo do período de embebição e secagem. O nível de água nos provetes é detetado visualmente e através da escala de cor nas imagens térmicas (figuras 3.55 e 3.56), no entanto, a influência do aquecimento da superfície pela lâmpada, que acentua o processo de secagem, dificulta a visualização de uma zona húmida evidente, ao contrário do que ocorreu no § 3.3.2.5.

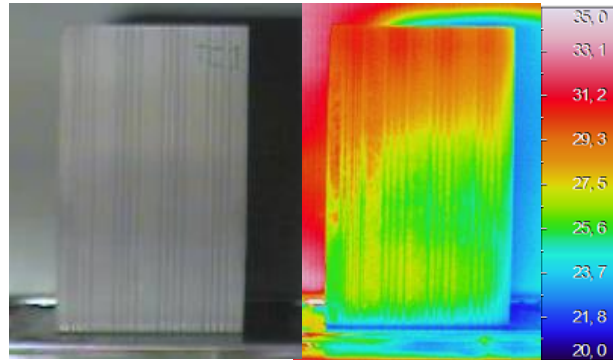


Figura 3.55 – Nível da água detetado nos provetes TF1.68 visualmente e na imagem térmica, aos 5760 minutos (final da fase de embebição)

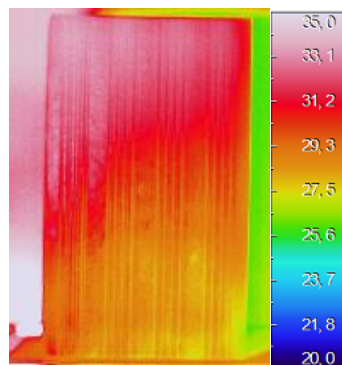


Figura 3.56 – Final da fase de secagem dos provetes TF1.135 (tempo de ensaio=6210 minutos)

3.4.2.6. Tijolo Cerâmico Maciço

As figuras 3.57 e 3.58 mostram a variação da massa e da ascensão capilar em função do tempo dos provetes de tijolo cerâmico maciço. Verifica-se que não há alterações significativas nos resultados devido à presença da lâmpada de infravermelhos, quando comparados com § 3.3.2.6, embora no caso anterior o aumento da massa do tijolo impermeabilizado tenha sido inferior porque o ensaio foi realizado posteriormente, utilizando o mesmo provete depois de ter sido seco num estufa.

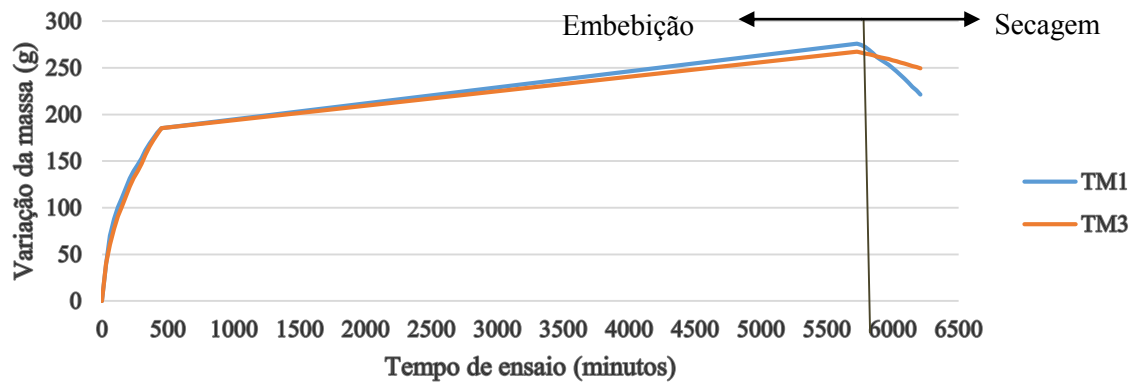


Figura 3.57 – Variação da massa ao longo do ensaio dos provetes TM1 e TM3

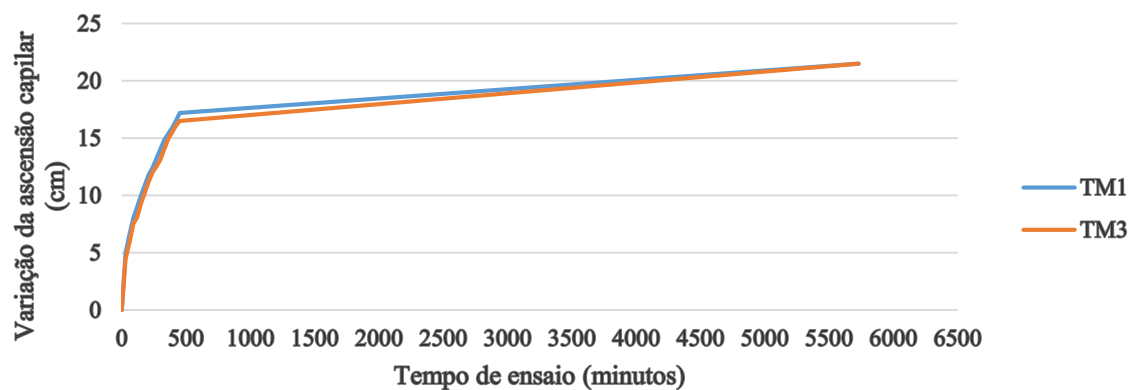


Figura 3.58 – Variação da ascensão capilar ao longo do ensaio dos provetes TM1 e TM3

Os termogramas TM1.02 a TF1.135 e TM3.02 a TM3.135 (anexo B) mostram as variações de temperatura superficial dos provetes de tijolo cerâmico maciço ao longo do período de embebição e secagem. O nível de água nos provetes é detetado visualmente e através da escala de cor nas imagens térmicas, embora na figura 3.59 já não se detetem heterogeneidades térmicas significativas uma vez que a frente húmida já tinha atingido a face superior dos provetes. As variações de temperatura observadas do lado esquerdo da imagem estão relacionadas com o facto de a lâmpada estar mais próxima desse lado do provete, aumentando a sua temperatura. Esse facto também é evidente no final do ensaio (figura 3.60).

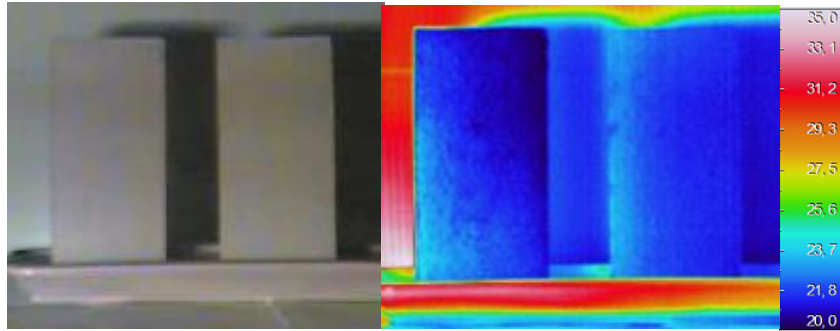


Figura 3.59 – Nível da água detetado nos provetes TF1.68 visualmente e na imagem térmica, aos 5760 minutos (final da fase de embebição)

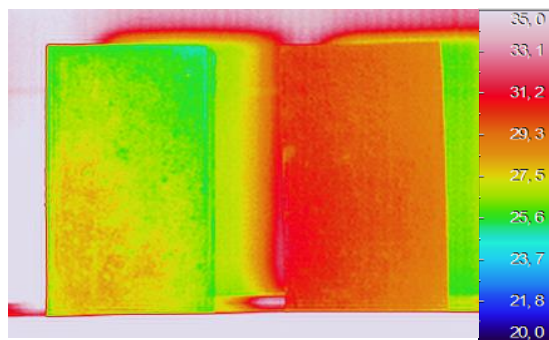


Figura 3.60 – Final da fase de secagem dos provetes TM1.135 e TM3.135 (tempo de ensaio=6210 minutos)

3.5. ENSAIO TIPO III

3.5.1. PROCEDIMENTOS DO ENSAIO

Neste ensaio a termografia foi utilizada para visualização da fissuração interna e externa através da humidificação do provete pelo topo. Foram ensaiados provetes de betão e madeira, tendo-se utilizado uma lâmpada de infravermelhos durante as 2 horas de ensaio, prosseguindo o ensaio durante mais 1h30 com a lâmpada desligada. Os termogramas foram analisados qualitativamente. A figura 3.61 mostra a montagem do ensaio. No quadro 3.5 indicam-se os parâmetros necessários para efetuar a calibração da câmara.



Figura 3.61 – Local de montagem do ensaio

Quadro 3.5 - Valores da temperatura, humidade relativa e temperatura refletida obtidos ao longo do ensaio Tipo III

	Período de embebição (horas)	Temperatura (°C)	Humidade Relativa (%)	Temperatura Refletida (°C)
1. ^o Dia	3,5	20	63,3	19,4

O procedimento de ensaio consistiu em:

- Tirar um termograma ao provete;
- Ligar o sistema de humidificação pelo topo. Durante duas horas efetuar termogramas de 5 em 5 minutos, com a lâmpada infravermelha ligada (posicionada à mesma altura do provete e a cerca de 1,10 metro do mesmo);
- Desligar a lâmpada infravermelha e tirar termogramas de 5 em 5 minutos durante cerca de 1h30.

Os termogramas registados ao longo do ensaio encontram-se apresentados, parcialmente, no anexo B.

A quantidade de água utilizada para cada provete foi:

- 270 ml de água no provete de betão BB4;
- 120 ml de água no provete de madeira M4;
- 80 ml de água no provete de madeira M6.

3.5.2. RESULTADOS OBTIDOS

O termograma dos provetes BB4, M4 e M6 (figura 3.62) foi efetuado quando os provetes se encontravam em condições de equilíbrio com o ambiente e antes de serem colocados em contacto com a água, estando portanto secos.

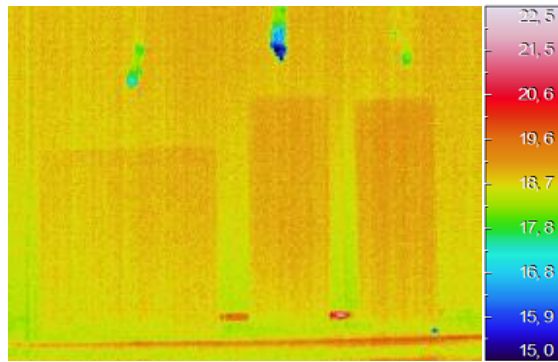


Figura 3.62 – Termograma do provete BB4.01, M4.01 e M6.01 (secos)

Os termogramas BB4.02 a BB4.26, M4.02 a M4.26 e M6.02 e M6.26 (anexo B) mostram as variações de temperatura superficial dos provetes de betão e madeira ao longo do período de ensaio. Com o aquecimento, a presença da água líquida permite detetar de forma evidente as anomalias dos provetes, nomeadamente, delaminações no canto superior esquerdo no caso do betão e fissuras verticais no caso do provete M4 de madeira (figura 3.62). No entanto, há que referir que a fissura no provete M6 estava a grande profundidade relativamente à face captada pela câmara, pelo que não foi possível detetá-la na imagem térmica (figuras 3.62 e 3.63). Apesar de não ser possível no provete de madeira M6 visualizar, através dos termogramas, a existência da fissura interna, verifica-se que a água escorre pela mesma ao longo do provete, chegando mais rapidamente à base do provete e humedecendo-a (figura 3.64). A figura 3.65 mostra o termograma no final da fase de arrefecimento, em que as anomalias não são tão facilmente detetáveis.

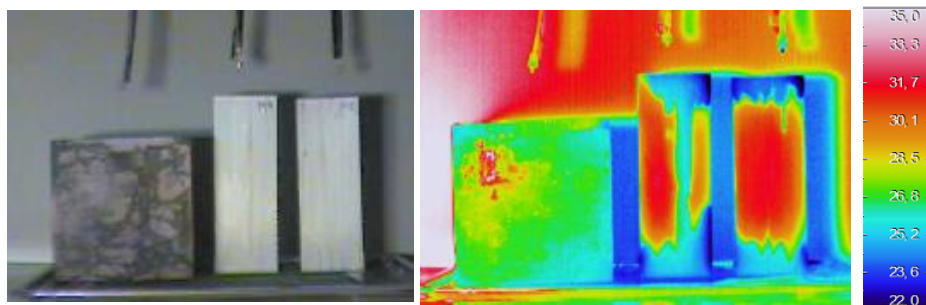


Figura 3.63– Termogramas dos provetes BB4.26, M4.26 e M6.26 aos 120 minutos (final do período de aquecimento)

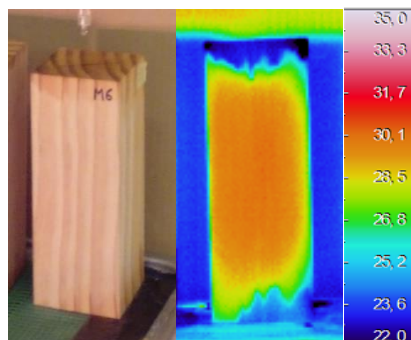


Figura 3.64 - Termograma do provete M6.17 no período de aquecimento

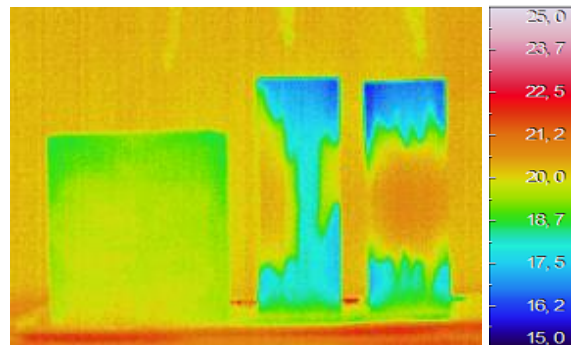


Figura 3.65– Final da fase de arrefecimento dos provetes BB4.45, M4.45 e M6.45 (tempo de ensaio=210 minutos)

3.6. ENSAIO TIPO IV

3.6.1. PROCEDIMENTOS DO ENSAIO

Este ensaio consistiu na utilização da termografia para visualização da fissuração interna e externa através da utilização de uma lâmpada infravermelha ligada durante duas horas e posteriormente desligada durante duas horas, em provetes de betão e madeira. Os termogramas foram avaliados qualitativamente. No quadro 3.6 indicam-se os parâmetros necessários para efetuar a calibração da câmara.

Quadro 3.6 - Valores da temperatura, humidade relativa e temperatura refletida obtidos ao longo do ensaio Tipo IV

	Período de embebição (horas)	Temperatura (°C)	Humidade Relativa (%)	Temperatura Refletida (°C)
1. ^o Dia	Sem embebição	21,3	51	19,8

O procedimento de ensaio consistiu em:

- Tirar um termograma ao provete;
- Nas primeiras duas horas tirar termogramas de 5 em 5 minutos, com a lâmpada infravermelha ligada (posicionada à mesma altura do provete e a cerca de 1,10 metro do mesmo).
- Desligar a lâmpada infravermelha e tirar termogramas de 5 em 5 minutos durante cerca de 2 horas.

Os termogramas registados ao longo do ensaio encontram-se apresentados, parcialmente, no anexo B.

3.6.2. RESULTADOS OBTIDOS

O termograma BB4, M4 e M6 (figura 3.66) foi efetuado quando os provetes se encontravam em condições de equilíbrio com o ambiente e antes de a lâmpada infravermelha ser ligada.

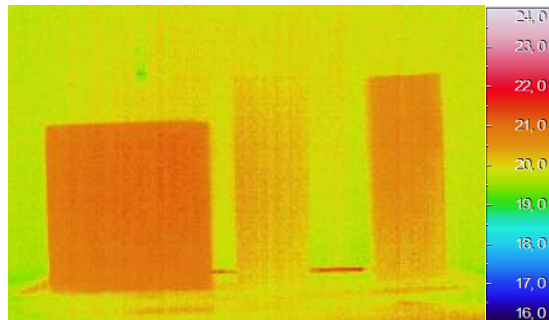


Figura 3.66 – Termograma do provete BB4.01, M4.01 e M6.01 (secos)

Os termogramas BB4.02 a BB4.26, M4.02 a M4.26 e M6.02 e M6.26 (anexo B) demonstram as variações de temperatura superficial dos provetes de betão e madeira ao longo do período de aquecimento. As possíveis anomalias são detetadas através da variação de cor nas imagens térmicas (figura 3.67). A zona mais fria exterior ao provete corresponde à sua sombra. Através da análise dos termogramas é possível verificar que se detetam anomalias no provete BB4 e M4, através de zonas mais quentes. No caso do betão a zona mais quente no canto superior esquerdo corresponde a uma delaminação e no caso do provete de madeira M4, a zona mais quente no centro do provete corresponde a uma fissura. No termograma do provete de madeira M6 não se deteta qualquer heterogeneidade térmica, uma vez que a fissura existente no provete é mais profunda em relação à face em estudo.

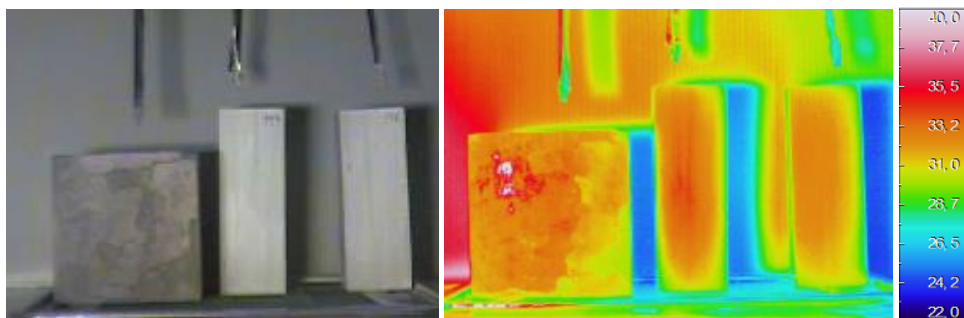


Figura 3.67 – Possíveis anomalias detetadas nos provetes BB4.26, M4.26 e M6.26 aos 120 minutos (com lâmpada infravermelha ligada)

A lâmpada infravermelha foi desligada aos 121 minutos, iniciando-se assim um processo de arrefecimento de 2 horas. Os termogramas BB4.29 a BB4.51, M4.29 a M4.51 e M6.29 a M6.51 (anexo B) mostram as variações de temperatura superficial dos provetes na fase de arrefecimento. Na fase de arrefecimento é difícil identificar as anomalias em qualquer um dos provetes (figura 3.68).

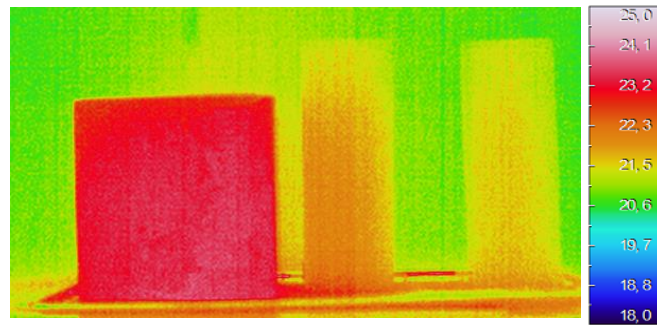


Figura 3.68 – Final do ensaio dos provetes BB4.51, M4.51 e M6.51 (tempo de ensaio=240 minutos)

3.7. SÍNTESE CRÍTICA

A termografia permite a deteção da presença de água líquida em diferentes materiais, assim como, identifica o limite superior do nível da água no provete. Na fase de embebição foi possível identificar a variação da temperatura superficial devido à ascensão capilar. Na fase de secagem a possibilidade de visualizar nas imagens térmicas a presença de água líquida no provete continua a ser possível, contudo, a presença de água líquida no provete vai diminuindo, tornando a variação da temperatura na superfície menor, e por sua vez, dificultando a identificação da presença de humidade nos termogramas.

A utilização da lâmpada infravermelha conduziu a um aumento nas temperaturas superficiais, assim como, a um aumento da variação da temperatura superficial, principalmente na fase de embebição (ensaio tipo II e III), tornando na maioria dos casos os termogramas mais definidos e a presença de humidade mais evidente. As únicas exceções foram os provetes de betão e granito (ensaio tipo II).

Na fase final do ensaio tipo II, verificou-se um ligeiro aumento na variação de temperatura nos provetes BB2, BB3, BC1, BC3, G3 e TM3. Este aumento deve-se ao aquecimento imposto pela lâmpada, aumentando a temperatura na zona seca e influenciando a secagem do provete, que passa a ser mais lenta, uma vez que a maior parte das faces dos provetes BB2, BB3, BC3, G3 e TM3 encontram-se impermeabilizadas.

No ensaio tipo I e II, nos provetes de madeira, verifica-se um ligeiro decréscimo na variação da ascensão capilar. Este fenómeno pode ser explicado pelas propriedades específica deste material.

No ensaio tipo III, através dos termogramas foi possível verificar a presença de humidade, o mesmo não se verificou visualmente pelo menos nos momentos iniciais da humidificação. No provete M6 deste ensaio, apesar de a fissura interna não ser visível visualmente nem no termograma, após 1h50 de humidificação, verificou-se que a água foi transportada pela fissura e começou a alastrar-se na parte inferior do provete. Posteriormente, a água depositou-se na tina e passou-se para um processo de humidificação pelo topo e de ascensão capilar pela base, o mesmo acontecendo com os provetes BB4 e M4.

Verifica-se que a utilização da lâmpada infravermelha para detetar anomalias superficiais pode ser bastante eficaz. Através da análise dos termogramas BB4 e M4 do ensaio tipo IV, os pontos com elevada temperatura, correspondem a anomalias existentes nos provetes. Segundo Maldague, se o fluxo de calor for da superfície para o interior do elemento, a anomalia aparece como uma zona quente, como pode ser verificado nos ensaios realizados [40].

No entanto, comparando os resultados do ensaio tipo III com os do ensaio tipo IV, verifica-se que é mais fácil e eficaz a deteção de fissuras e delaminações quando os provetes estão húmidos.

4

ANÁLISE QUANTITATIVA DOS RESULTADOS

4.1. NOTA INTRODUTÓRIA

Após a análise qualitativa efetuada no capítulo 3, pretende-se agora avaliar quantitativamente os resultados obtidos nos ensaios tipo I (termografia passiva) e ensaios tipo II, III e IV (termografia ativa), utilizando para tal os diferenciais de temperaturas (ΔT), bem como, as funções de contraste segundo Maldague e Valilov [24, 25]. As equações utilizadas nesta análise encontram-se descritas no § 2.1.6.3 e § 2.1.6.4. Os procedimentos para determinação dos parâmetros quantitativos são os seguintes:

Procedimento 1 - Ensaio Tipo II (Figura 4.1):

A:

- Fazer uma caixa (1) na parte seca e retirar o valor médio da temperatura = $T_{sd}(t) = T_{nd}(t)$;
- Fazer uma caixa (2) na parte molhada e retirar o valor médio da temperatura = $T_d(t)$;

B:

- Valor máximo da temperatura da caixa (1) e valor mínimo da temperatura da caixa (2), para potenciar as diferenças;

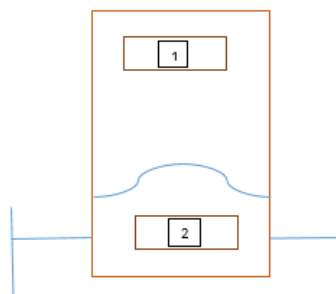


Figura 4.1 – Procedimento 1

Procedimento 2 - Ensaio Tipo II (Figura 4.2):

- Retirar o valor da temperatura máxima no provete = $T_{sd}(t) = T_{nd}(t)$;
- Retirar o valor da temperatura mínima no provete = $T_d(t)$;

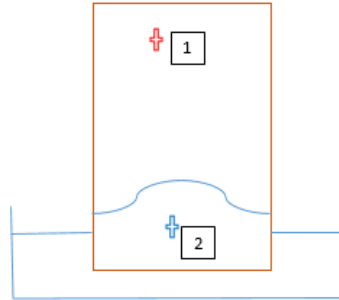


Figura 4.2 – Procedimento 2

A análise de resultados para os ensaios tipo III e IV será encarada de acordo com o seguinte procedimento:

Procedimento 3 - Ensaio Tipo III e IV (Figura 4.3):

- Retirar o valor da temperatura num ponto sem fissura no provete = $T_{sd}(t) = T_{nd}(t)$;
- Retirar o valor da temperatura num ponto com fissura do provete = $T_d(t)$;

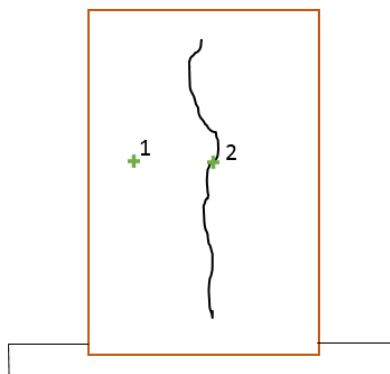


Figura 4.3 – Procedimento 3

4.2. ENSAIO TIPO I

4.2.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS PROVETES DE BETÃO

Os gráficos das figuras 4.4, 4.5 e 4.6 mostram o delta-T em função do tempo para os provetes de betão.

A figura 4.4 mostra os valores do delta-T obtidos ao longo das fases de embebição e secagem para o procedimento 1-A.

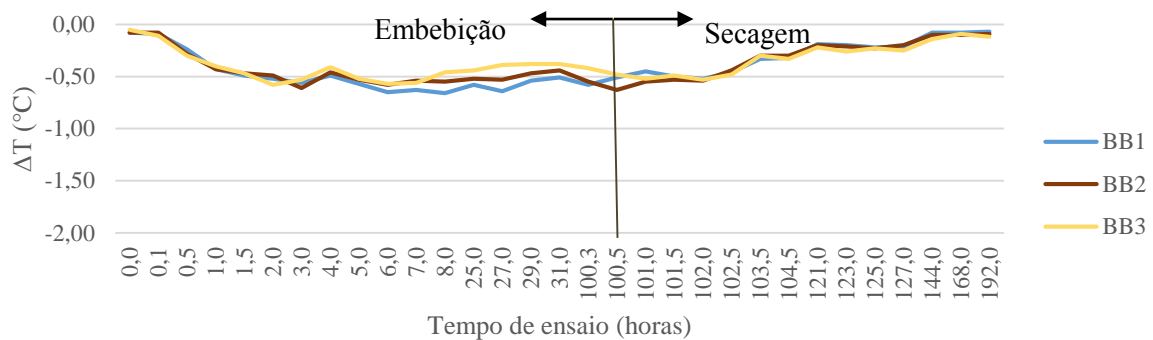


Figura 4.4 – Variação do delta-T em função do tempo para os provetes BB1, BB2 e BB3 para o procedimento 1-A

Nota-se que na fase de embebição houve uma ligeira diminuição do delta-T nas primeiras horas e depois foi estabilizando. Na fase de secagem o valor do delta-T aumentou de forma gradual e lentamente. De notar que neste procedimento, a variação de temperatura em todos os provetes é muito semelhante, principalmente na fase de secagem. Deve também referir-se que o valor de delta – T é muito pequeno, uma vez que as heterogeneidades térmicas neste ensaio são pouco significativas (figuras 3.35 e 3.36 em § 3.3.2.1).

A figura 4.5 mostra os valores do delta-T obtidos ao longo das fases de embebição e secagem para o procedimento 1-B.

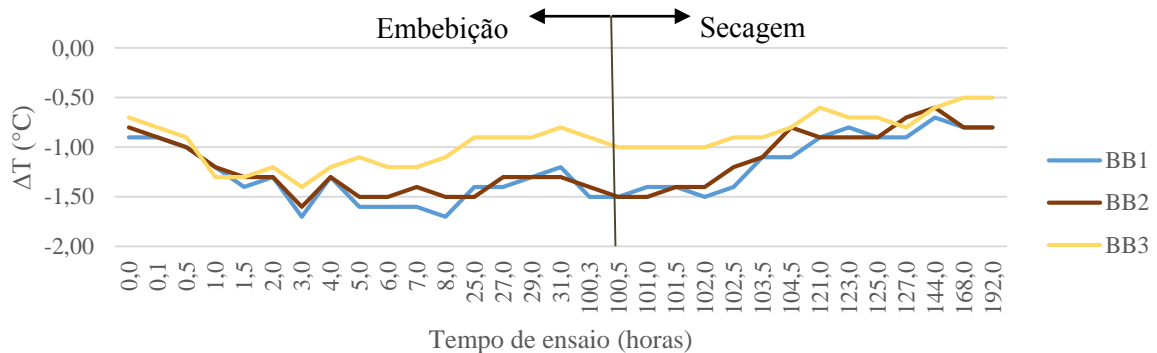


Figura 4.5 – Variação do delta-T em função do tempo para os provetes BB1, BB2 e BB3 para o procedimento 1-B

Nota-se que na fase de embebição houve uma diminuição do valor nas primeiras horas, mais acentuada que no anterior gráfico (figura 4.4), no entanto, com maior divergência de valores entre os provetes, o que está claramente relacionado com o critério, que enfatiza a quantificação das heterogeneidades. O provete BB3 não acompanha esta estabilização, uma vez que depois da diminuição das primeiras horas se verifica um ligeiro aumento até à fase final da embebição. Na fase de secagem o valor do delta-T aumenta de forma gradual, sempre com o provete BB3 com maior valor.

A figura 4.6 mostra os valores do delta-T obtidos ao longo das fases de embebição e secagem para o procedimento 2.

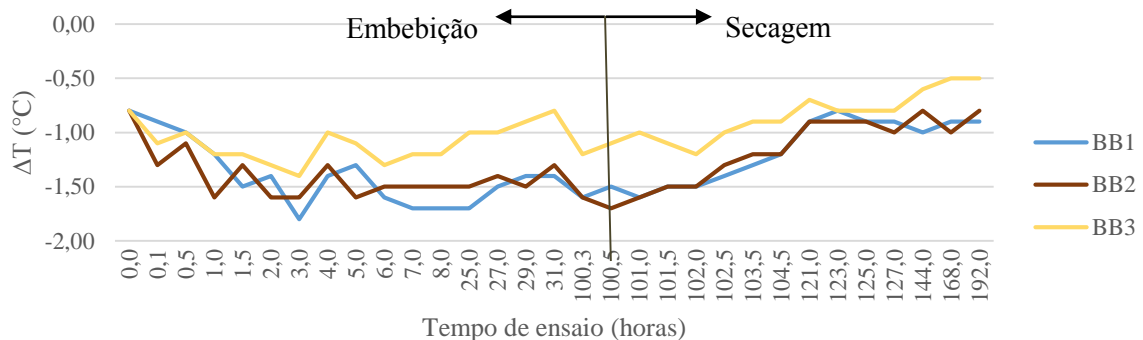


Figura 4.6 – Variação do delta-T em função do tempo para os provetes BB1, BB2 e BB3 para o procedimento 2

Verifica-se que os resultados obtidos neste procedimento não diferem significativamente do procedimento 1-B, embora tenham uma variabilidade ligeiramente superior.

De notar que, para qualquer procedimento e durante a fase de embebição e secagem o provete BB3 apresenta sempre valores menores que os restantes provetes. Este fenómeno pode ser explicado pelo facto de este provete ter quatro das suas fases impermeabilizadas, impossibilitando uma embebição e secagem acentuadas, garantindo assim menores heterogeneidades.

Comparando os três procedimentos, verifica-se que nos procedimentos 1-B e 2 tem-se maior inclinação das curvas no início da embebição e no final da secagem, já o procedimento 1-A apresenta menor inclinação assim como menores valores de delta-T em valor absoluto. Os provetes BB1 e BB2 têm valores muito próximos em todos os procedimentos, já o BB3 tem valores sempre inferiores em valor absoluto. Utilizando os procedimentos 1-B e 2 é possível observar uma maior divergência no valor do delta-T de cada provete, concluindo-se então que o provete BB3 é aquele que tem menor embebição, no entanto, tem também uma secagem menos acentuada. A estabilização na fase final da secagem demonstra que a zona molhada começa a desaparecer e portanto a deixar de ser detetada, passando os valores desta a ser próximos dos valores da zona seca.

Os valores elevados de delta-T demonstram que existe uma diferença acentuada entre a zona seca e a zona molhada e, o procedimento que melhor demonstra essa diferença é o procedimento 1-B, pois utiliza o valor máximo da caixa na zona seca e o valor mínimo na caixa da zona molhada (§ 4.1).

4.2.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS PROVETES DE BETÃO CELULAR AUTOCLAVADO

As figuras 4.7 a 4.9 mostram o diferencial de temperatura (delta-T) em função do tempo, dos provetes de betão celular autoclavado.

A figura 4.7 mostra os valores do delta-T obtidos ao longo das fases de embebição e secagem para o procedimento 1-A.

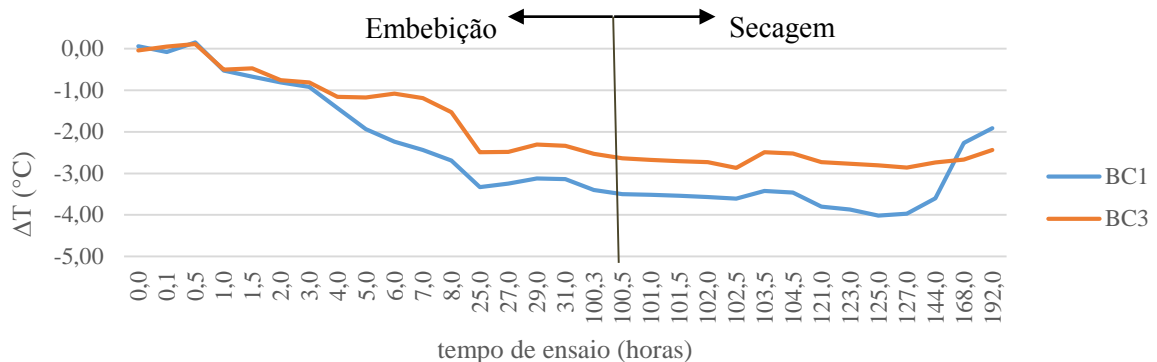


Figura 4.7 – Variação do delta-T em função do tempo para os provetes BC1 e BC3 para o procedimento 1-A

Na fase de embebição, verifica-se que a zona molhada começa a ser visível no termograma meia hora após o começo do ensaio, ou seja, depois do aumento inicial do valor de delta-T. No final da fase de embebição o valor estabiliza. Na fase de secagem, ambos os provetes têm um valor mais ou menos constante, no entanto, na fase final da secagem no provete BC1 verifica-se uma rápida secagem. Estes resultados estão de acordo com o observado no § 3.3.2.2.

A figura 4.8 demonstra os valores do delta-T obtidos ao longo das fases de embebição e secagem para o procedimento 1-B. Não há grandes diferenças relativamente ao observado para o procedimento 1-A, nos valores obtidos que são ligeiramente inferiores.

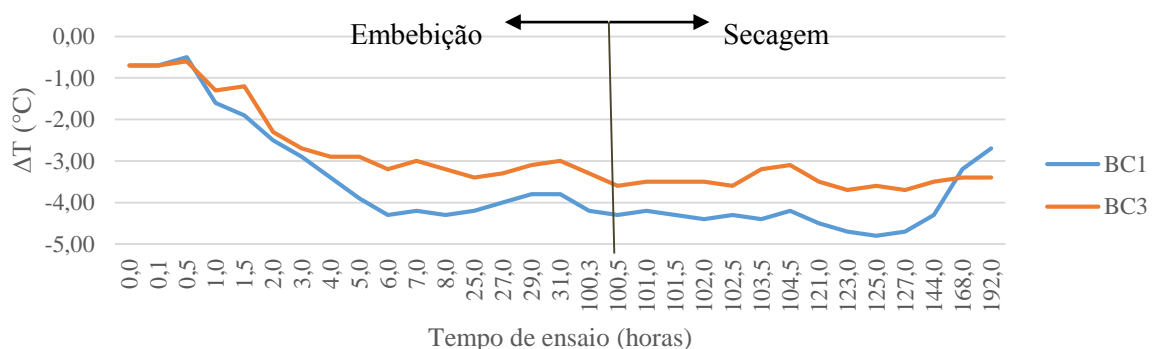


Figura 4.8 – Variação do delta-T em função do tempo para os provetes BC1 e BC3 para o procedimento 1-B

A figura 4.9 demonstra os valores do delta-T obtidos ao longo das fases de embebição e secagem para o procedimento 2. Comparando os três procedimentos, verifica-se que nos procedimentos 1-B e 2, no início da embebição, a inclinação das curvas é mais acentuada, com valores de delta-T mais baixos, ou

seja, estes dois procedimentos demonstram melhor o aparecimento da zona molhada. Quanto à fase de secagem, nos três procedimentos verifica-se que o provete BC1 é aquele que obtém melhores resultados para a secagem, no entanto, quando o ensaio termina, as curvas não se encontram estabilizadas, concluindo-se então que ainda existe humidade presente no provete. O provete BC3, ao longo de todo o ensaio, para todos os procedimentos tem sempre menores valores absolutos de delta-T do que o provete BC1, o que demonstra uma menor embebição e menor secagem.

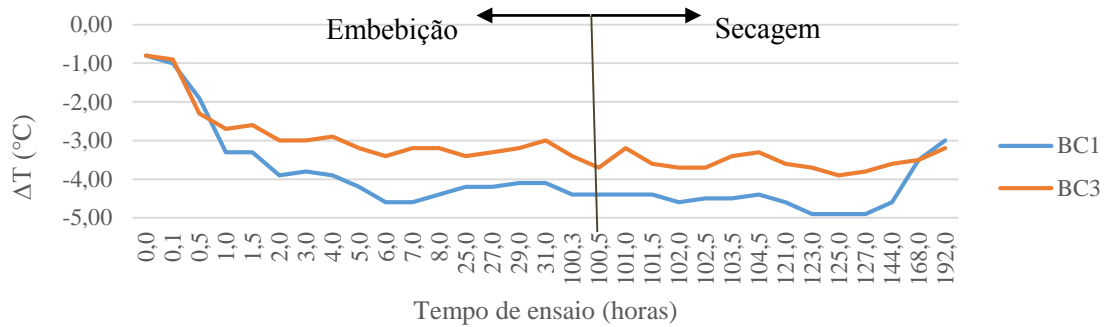


Figura 4.9 – Variação do delta-T em função do tempo para os provetes BC1 e BC3 para o procedimento 2

Tal como no caso anterior, os valores elevados de delta-T demonstram que existe uma diferença acentuada entre a zona seca e a fase molhada e, o procedimento que melhor demonstra essa diferença é o procedimento 1-B (§ 4.1).

4.2.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS PROVETES DE MADEIRA

Os seguintes gráficos demonstram o diferencial de temperatura em função do tempo dos provetes de madeira. As figuras 4.10, 4.11 e 4.12 mostram os valores do delta-T obtidos ao longo das fases de embebição e secagem para os procedimentos 1-A, 1-B e 2, respetivamente.

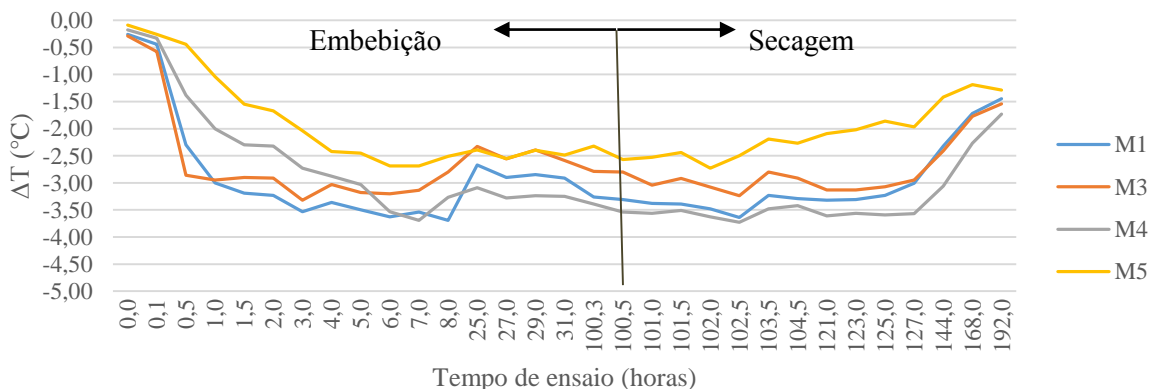


Figura 4.10 – Variação do delta-T em função do tempo para os provetes M1, M3, M4 e M5 para o procedimento 1-A

A grande diferença entre os três procedimentos, além dos valores obtidos, verifica-se na fase inicial de embebição, em que no procedimento 2 há uma variação muito mais acentuada do valor de delta-T (figuras 4.10 e 4.11). Já na fase final de embebição, todos os procedimentos mostram a mesma tendência, com uma ligeira diminuição do valor absoluto de delta-T. Na fase inicial da secagem, o valor absoluto de delta-T encontra-se estabilizado, começando no final do ensaio a diminuir.

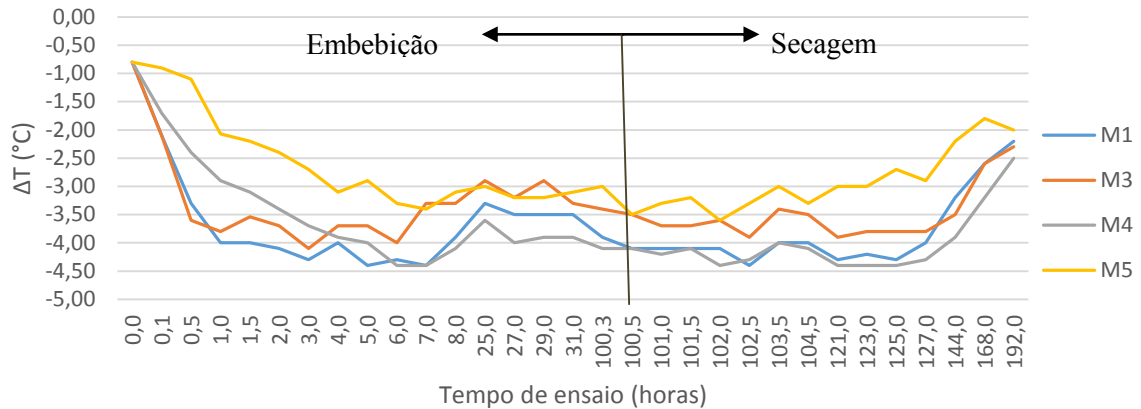


Figura 4.11 – Variação do delta-T em função do tempo para os provetes M1, M3, M4 e M5 para o procedimento 1-B

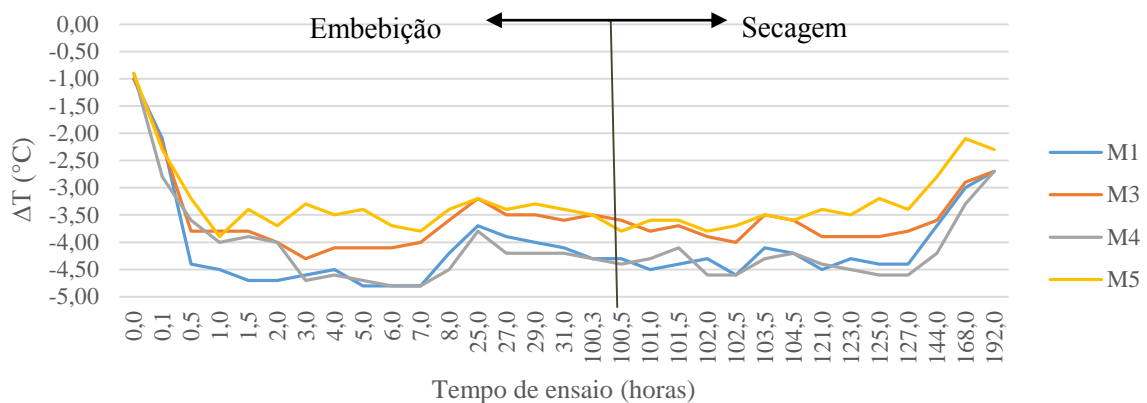


Figura 4.12 – Variação do delta-T em função do tempo para os provetes M1, M3, M4 e M5 para o procedimento 2

Comparando os três procedimentos, verifica-se também que em todos os procedimentos os provetes M3 e M5 tem menores valores de delta-T em valor absoluto ao longo de todo o ensaio, o que pode ser explicado pelas faces impermeabilizadas, que dificulta a humedificação dos provetes, assim como a secagem. Contrariamente, no provete M4 obtém-se um valor mais elevado em valor absoluto de delta-T, o que demonstra que a capacidade de embebição deste provete é maior que a dos restantes devido à existência de fissuras. Na fase final de embebição, dá-se uma ligeira diminuição do valor absoluto de delta-T em todos os procedimentos o que pode resultar das propriedades específicas da madeira. Na fase final da secagem, as curvas ainda não estão estabilizadas mantendo a tendência para uma diminuição do valor absoluto do delta-T, o que indicará a presença de humidade no provete.

4.2.4. ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS PROVETES DE PEDRA GRANÍTICA

Os gráficos das figuras 4.13, 4.14 e 4.15 mostram o diferencial de temperatura em função do tempo dos provetes de pedra granítica, considerando o procedimento 1-A, 1-B e 2, respetivamente.

Tal como no betão, os valores absolutos de delta-T são relativamente baixos, o que está relacionado com a homogeneidade dos termogramas obtidos (§ 3.3.2.4). No procedimento 1-A as diferenças entre a temperatura na zona húmida e na zona molhada ainda são menores porque resulta de uma média, que atenua os pontos de temperatura mais elevada e mais baixa.

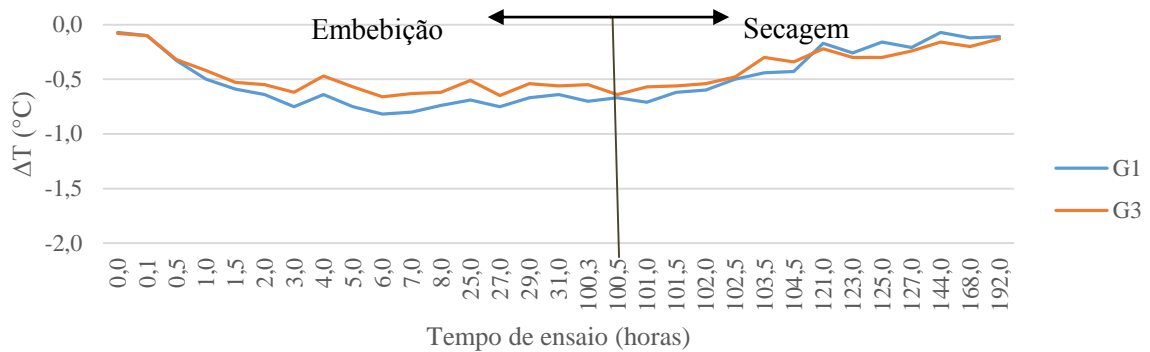


Figura 4.13 – Variação do delta-T em função do tempo para os provetes G1 e G3 para o procedimento 1-A

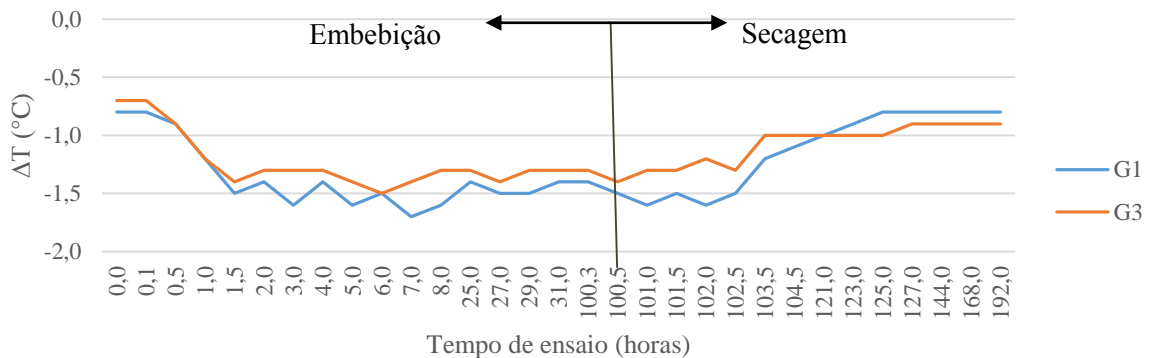


Figura 4.14 – Variação do delta-T em função do tempo para os provetes G1 e G3 para o procedimento 1-B

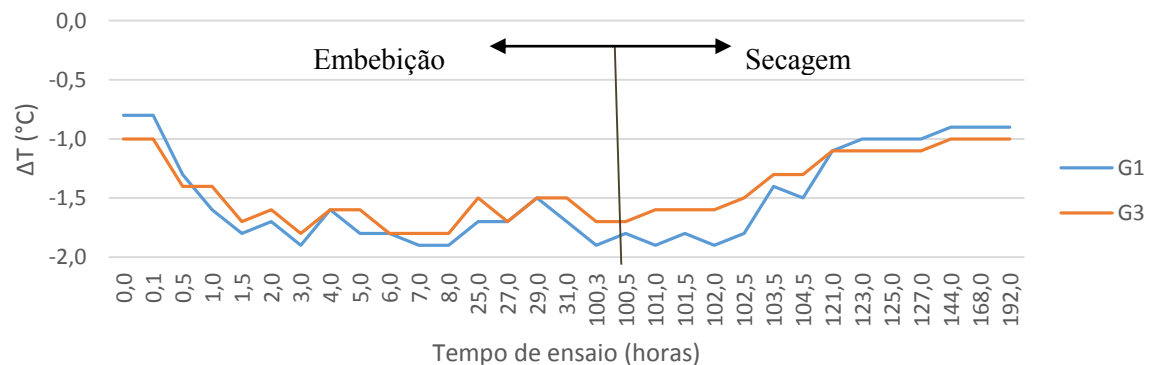


Figura 4.15 – Variação do delta-T em função do tempo para os provetes G1 e G3 para o procedimento 2

Comparando os três procedimentos, verifica-se também que em todos os procedimentos o provete G3 tem menores valores absolutos de delta-T ao longo de todo o ensaio, embora na fase final de secagem, este passa a ter maiores valores absolutos, o que revela uma menor capacidade de secagem. Na fase final do ensaio, as curvas encontram-se estáveis e com valores bastante próximos dos iniciais, concluindo-se que os provetes estarão praticamente secos.

4.2.5. ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS PROVETES DE TIJOLO FURADO

As figuras 4.16, 4.17 e 4.18 mostram o diferencial de temperatura em função do tempo dos provetes do delta-T de tijolo cerâmico furado, para os procedimentos 1-A, 1-B e 2, respetivamente.

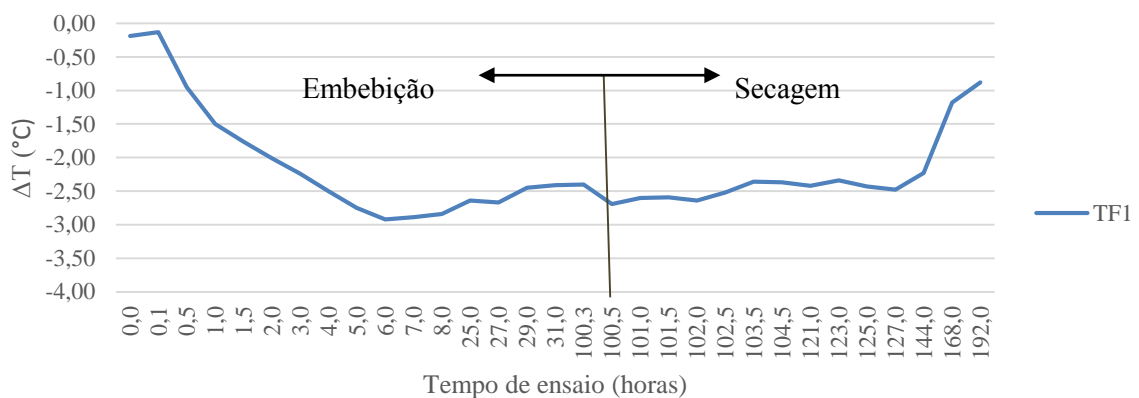


Figura 4.16 – Variação do delta-T em função do tempo para os provetes TF1 para o procedimento 1-A

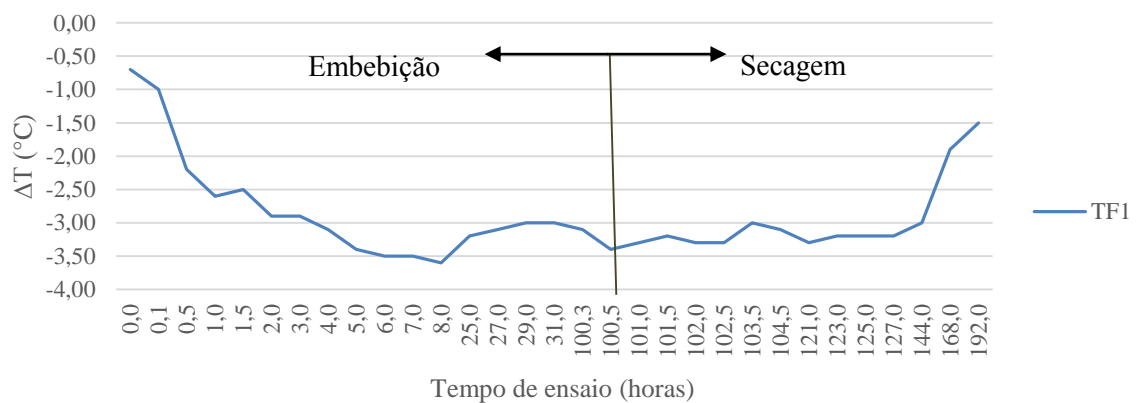


Figura 4.17 – Variação do delta-T em função do tempo para os provetes TF1 para o procedimento 1-B

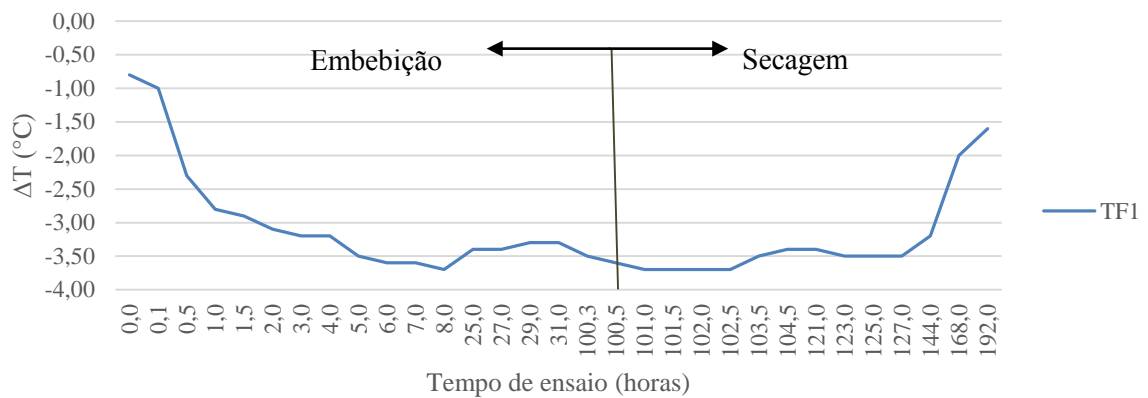


Figura 4.18 – Variação do delta-T em função do tempo para os provetes TF1 para o procedimento 2

Comparando os três procedimentos, verifica-se que em todos os procedimentos os gráficos obtidos são similares, contudo obtém-se valores absolutos mais baixos no procedimento 1-A (figura 4.16). O facto de se obterem gráficos similares em todos os procedimentos indica que qualquer um dos procedimentos poderia ser utilizado para identificar a zona molhada no provete de tijolo cerâmico, uma vez que as heterogeneidades detetadas pela câmara são muito evidentes (§ 3.3.2.5). Na fase final do ensaio, as curvas do delta-T continua a evoluir, pelo que se poderá concluir ainda se encontra humidade no provete.

4.2.6. ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS PROVETES DE TIJOLO MACIÇO

As figuras 4.19, 4.20 e 4.21 mostram o diferencial de temperatura em função do tempo dos provetes de tijolo cerâmico maciço, para os procedimentos 1-A, 1-B e 2, respetivamente.

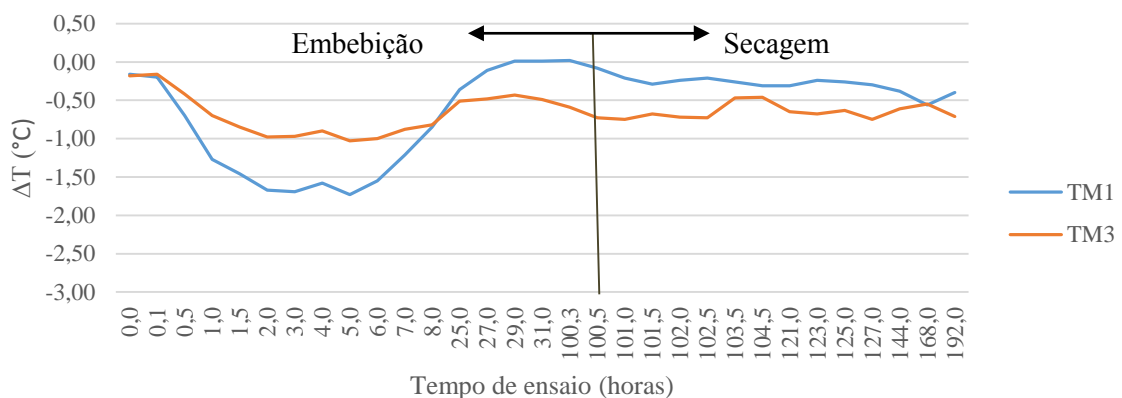


Figura 4.19 – Variação do delta-T em função do tempo para os provetes TM1 e TM3 para o procedimento 1-A

Na fase de embebição, verifica-se um aumento acentuado no valor absoluto de delta-T, principalmente no provete TM1, que posteriormente estabiliza, diminuindo ligeiramente em valor absoluto no final da embebição. O delta-T aproxima-se de zero porque a frente húmida atinge o topo do provete antes do final da fase de embebição. No início da fase de secagem, o valor de delta-T aumenta ligeiramente em

valor absoluto, mantendo-se constante até ao final do ensaio, ou seja, a parte de cima do provete começa a secar.

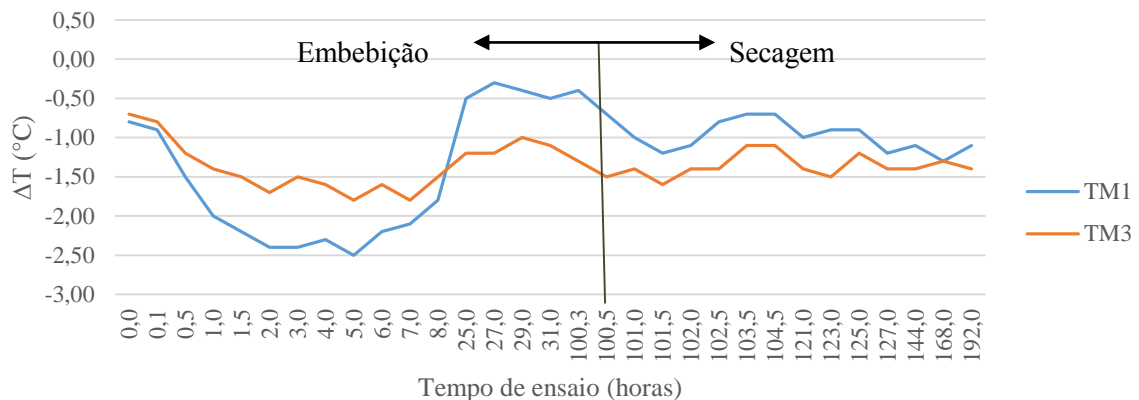


Figura 4.20 – Variação do delta-T em função do tempo para os provetes TM1 e TM3 para o procedimento 1-B

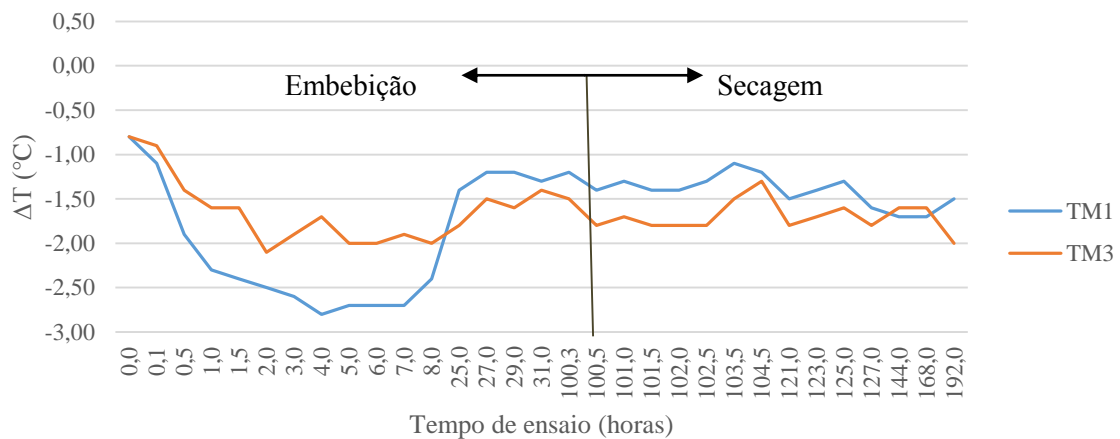


Figura 4.21 – Variação do delta-T em função do tempo para os provetes TM1 e TM3 para o procedimento 2

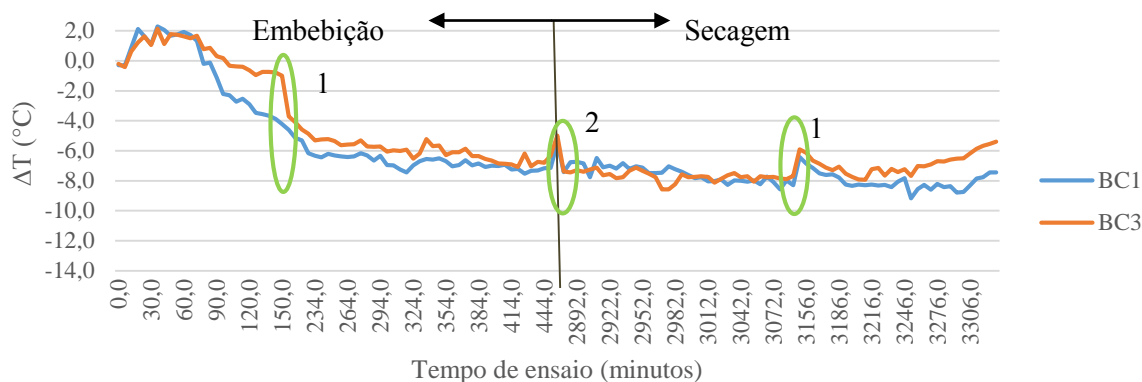
Comparando os três procedimentos, verifica-se que em todos os procedimentos o gráfico obtido é similar, contudo obtém-se valores mais baixos em valor absoluto no procedimento 1-A (figura 4.19). O facto de se obter gráficos similares em todos os procedimentos indica que qualquer um dos procedimentos poderia ser utilizado para identificar a presença de humidade no provete de tijolo maciço. A diminuição do valor absoluto do delta-T que se dá na fase final de embebição mostra que os provetes TM1 e TM3 se encontravam totalmente embebidos em água. O valor baixo que se obtém na fase de secagem dos provetes comprova que a secagem dos mesmos é bastante lenta e até ao final do ensaio os provetes ainda estão húmidos.

4.3. ENSAIO TIPO II

4.3.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS PROVETES DE BETÃO CELULAR AUTOCLAVADO

Os gráficos das figuras 4.22 a 4.31 mostram o valor do delta-T, TC e TRC em função do tempo dos provetes de betão celular.

A figura 4.22 mostra os valores do delta-T obtidos ao longo das fases de embebição e secagem para o procedimento 1-A. Neste procedimento, para análise do delta-T, só foram considerados valores a partir dos 96 minutos no provete BC1 e dos 150 minutos no provete BC3 (figura 4.23), ou seja, quando parte da caixa selecionada está com humidade, assim como as zonas 1 e 2 selecionadas no gráfico, não serão consideradas na análise. A partir desse momento pode-se verificar que houve um ligeiro aumento no valor absoluto de delta-T e depois esse valor estabilizou. Na fase de secagem, o valor de delta-T mantém-se constante e no final dá-se um ligeiro decréscimo deste valor absoluto, no entanto, os provetes continuam húmidos.



1 - Paragem durante a hora de almoço; 2 - Paragem de um dia para o outro

Figura 4.22 - Variação do delta-T em função do tempo para os provetes BC1 e BC3 para o procedimento 1-A

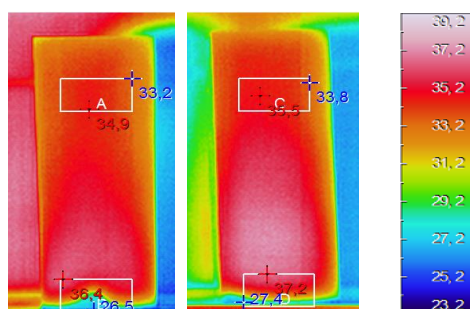
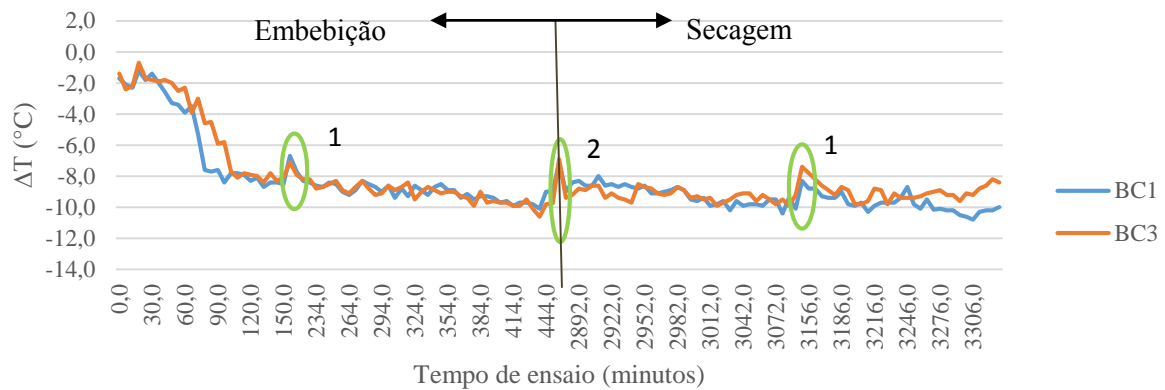


Figura 4.23 - Procedimento 1-A nos provetes de betão BC1 aos 96 minutos e BC3 aos 150 minutos

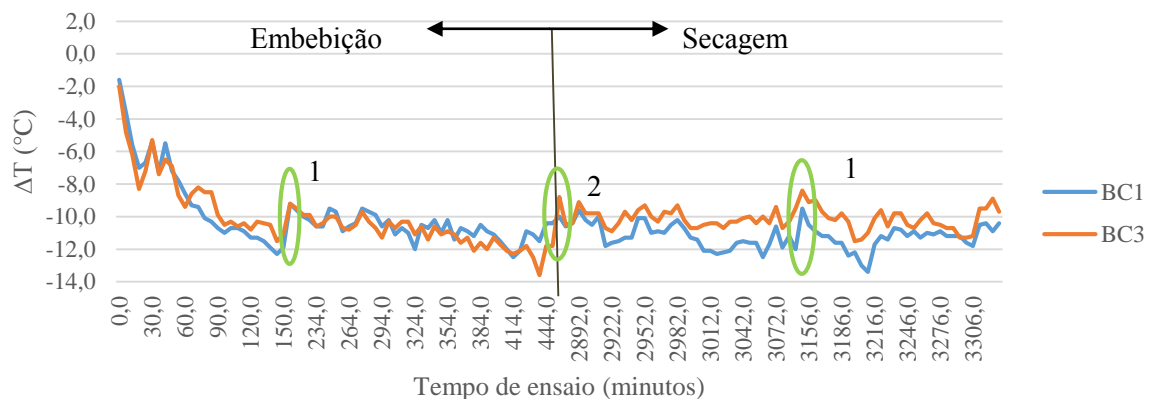
A figura 4.24 mostra os valores do delta-T obtidos ao longo das fases de embebição e secagem para o procedimento 1-B. Os resultados obtidos são muito semelhantes aos do procedimento 1-A.



1 - Paragem durante a hora de almoço; 2 - Paragem de um dia para o outro

Figura 4.24 - Variação do delta-T em função do tempo para os provetes BC1 e BC3 para o procedimento 1-B

A figura 4.25 mostra os valores do delta-T obtidos ao longo das fases de embebição e secagem para o procedimento 2. Comparando os três procedimentos, verifica-se que em todos os procedimentos os comportamentos são similares, no entanto, o aumento do valor absoluto de delta-T é menor no procedimento 1-A. Na fase de embebição, para todos os procedimentos, verifica-se que o provete BC3 tem menor embebição, assim como na fase de secagem, tem menor secagem. Os valores absolutos elevados de delta-T mostram que existe uma diferença entre a zona seca e a fase molhada e, o procedimento que melhor demonstra essa diferença é o procedimento 1-B, pois utiliza o valor máximo da caixa na zona seca e o valor mínimo da caixa da zona molhada (§ 4.1).



1 - Paragem durante a hora de almoço; 2 - Paragem de um dia para o outro

Figura 4.25 - Variação do delta-T em função do tempo para os provetes BC1 e BC3 para o procedimento 2

As figuras 4.26, 4.27 e 4.28 mostra os valores da função de contraste TC obtidos ao longo das fases de embebição e secagem para o procedimento 1-A, 1-B e 2. No começo da embebição, e no começo da secagem, a função de contraste atinge o seu pico máximo, o qual coincide com os momentos em que começa a ser visível a humidade nos provetes e melhor se visualiza a humidade (na fase de secagem). No entanto, é importante frisar que nestes provetes não se verificam picos bem definidos como os

obtidos por Bauer et al. (2015), uma vez que, a área zona molhada por provetes de betão celular autoclavado encontra-se totalmente húmida ao longo de quase todo o processo.

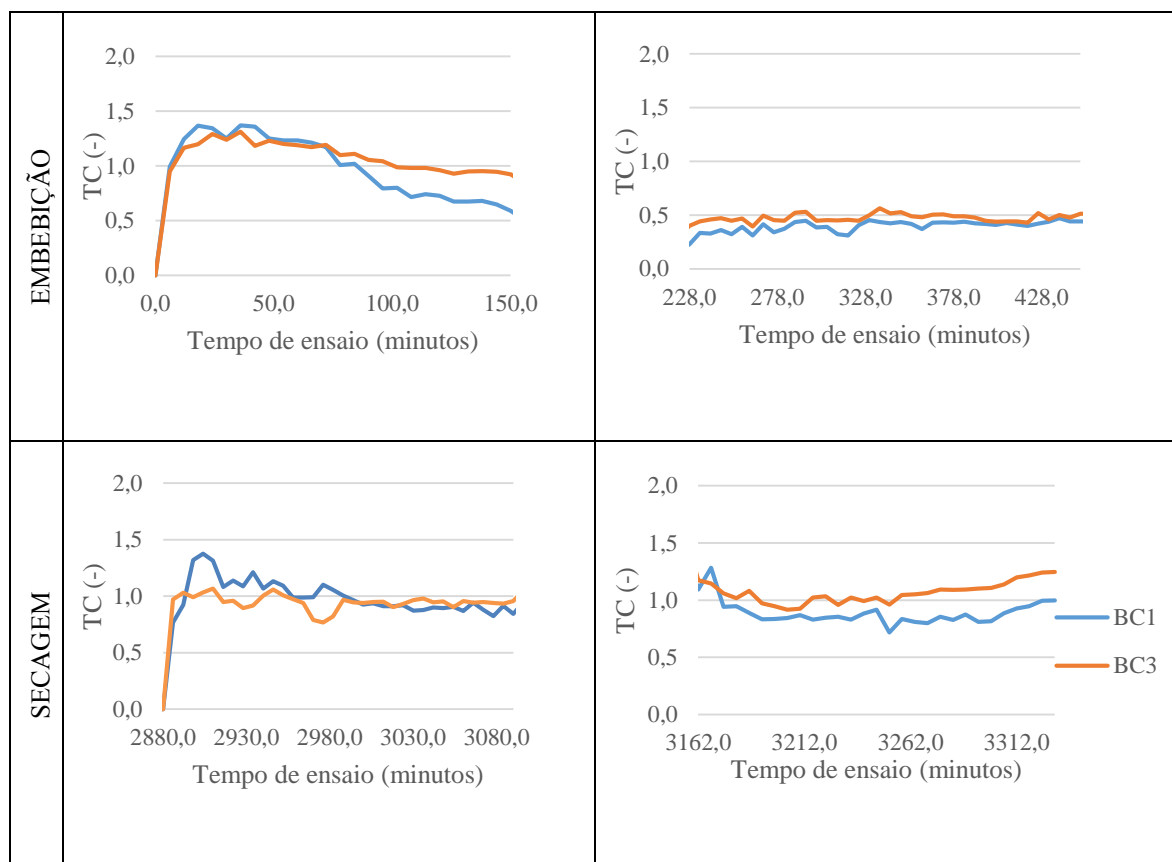
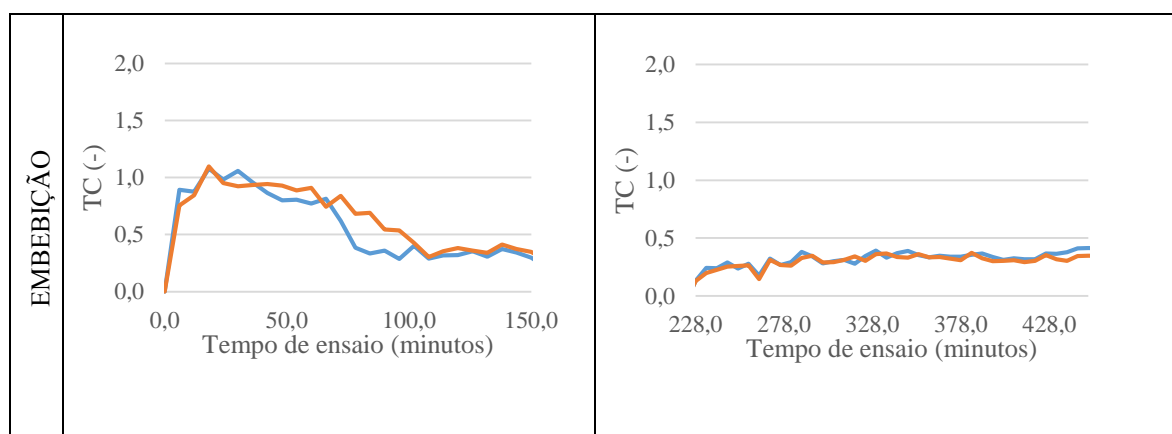


Figura 4.26 - Função de contraste TC em função do tempo para os provetes BC1 e BC3 para o procedimento 1-A



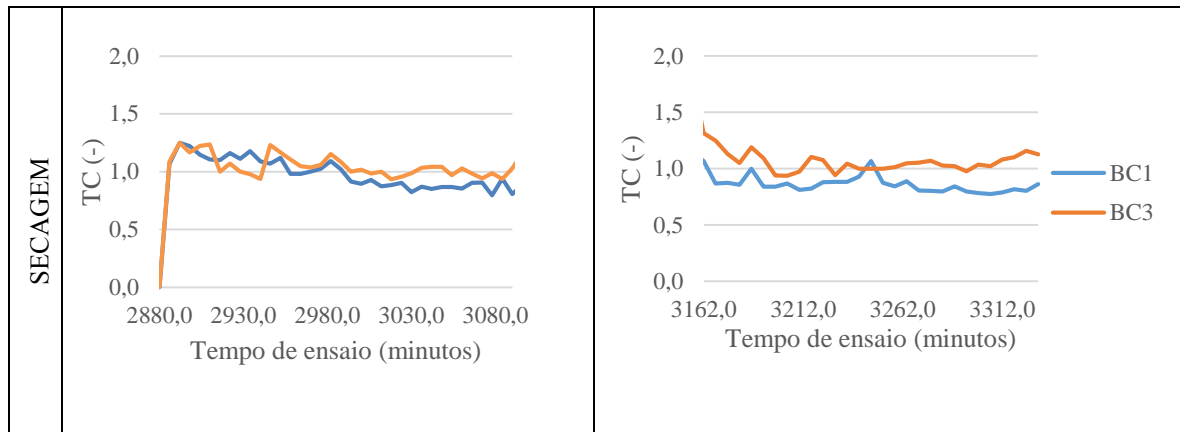


Figura 4.27 - Função de contraste TC em função do tempo para os provetes BC1 e BC3 para o procedimento 1-B

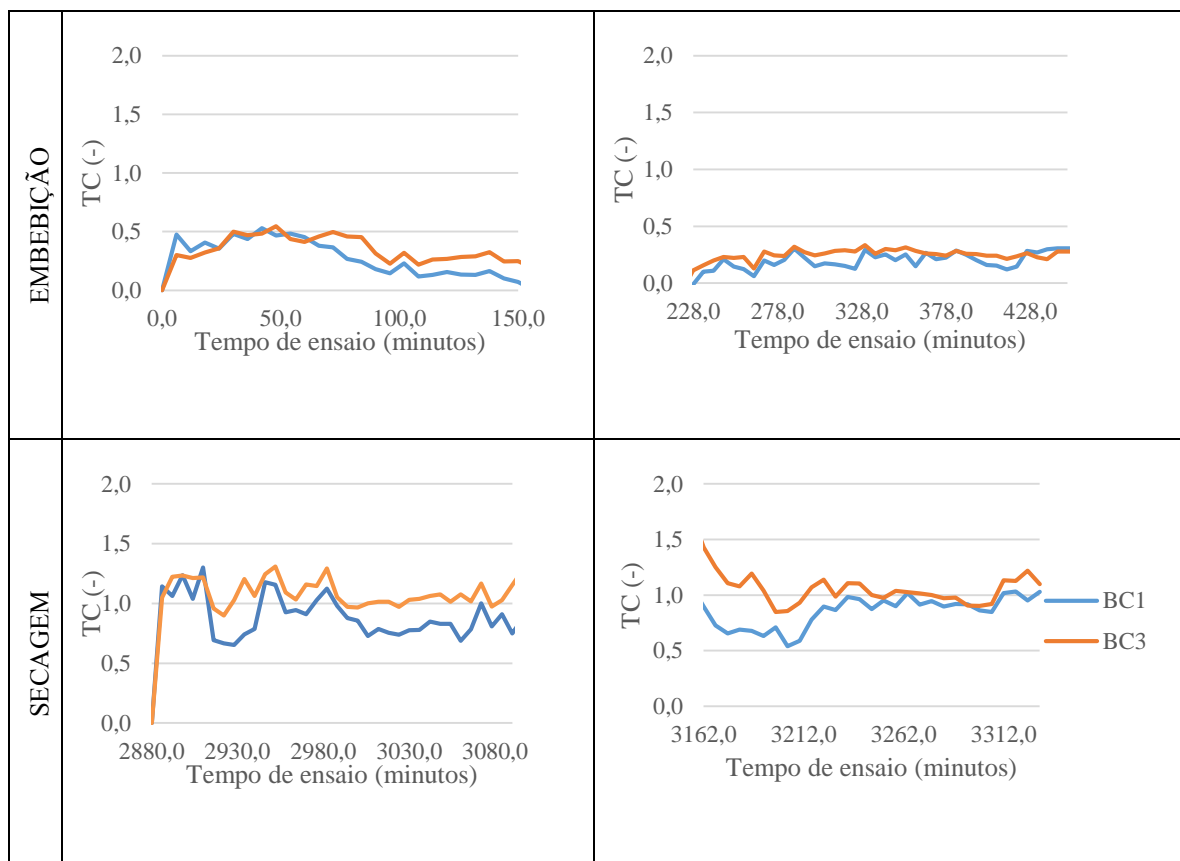


Figura 4.28 - Função de contraste TC em função do tempo para os provetes BC1 e BC3 para o procedimento 2

Os valores de TC demonstram que a partir do minuto 12 a humidade começa a estar presente no provete, posteriormente dá-se uma ligeira diminuição do valor de TC, uma vez que a humidade no provete começa a aumentar, ou seja, o valor do diferencial da área molhada com a área molhada inicial diminui (equação 2.7 do § 2.1.6.4). Na fase de secagem, o valor de TC mantém-se constante, ou seja, a humidade

está sempre presente até ao fim do ensaio. A diferença entre o provete impermeabilizado BC3 e não impermeabilizado BC1 é mais evidente na fase de secagem. Em qualquer um dos procedimentos, verifica-se que a secagem é mais lenta no provete impermeabilizado BC3, por isso tem maiores valores de TC. Na fase de embebição os valores são semelhantes, o que mostra que, nesta fase, não é muito relevante o facto de o provete estar impermeabilizado.

As figuras 4.29, 4.30 e 4.3 demonstra os valores da função de contraste TRC obtidos ao longo das fases de embebição e secagem para o procedimento 1-A, 1-B e 2.

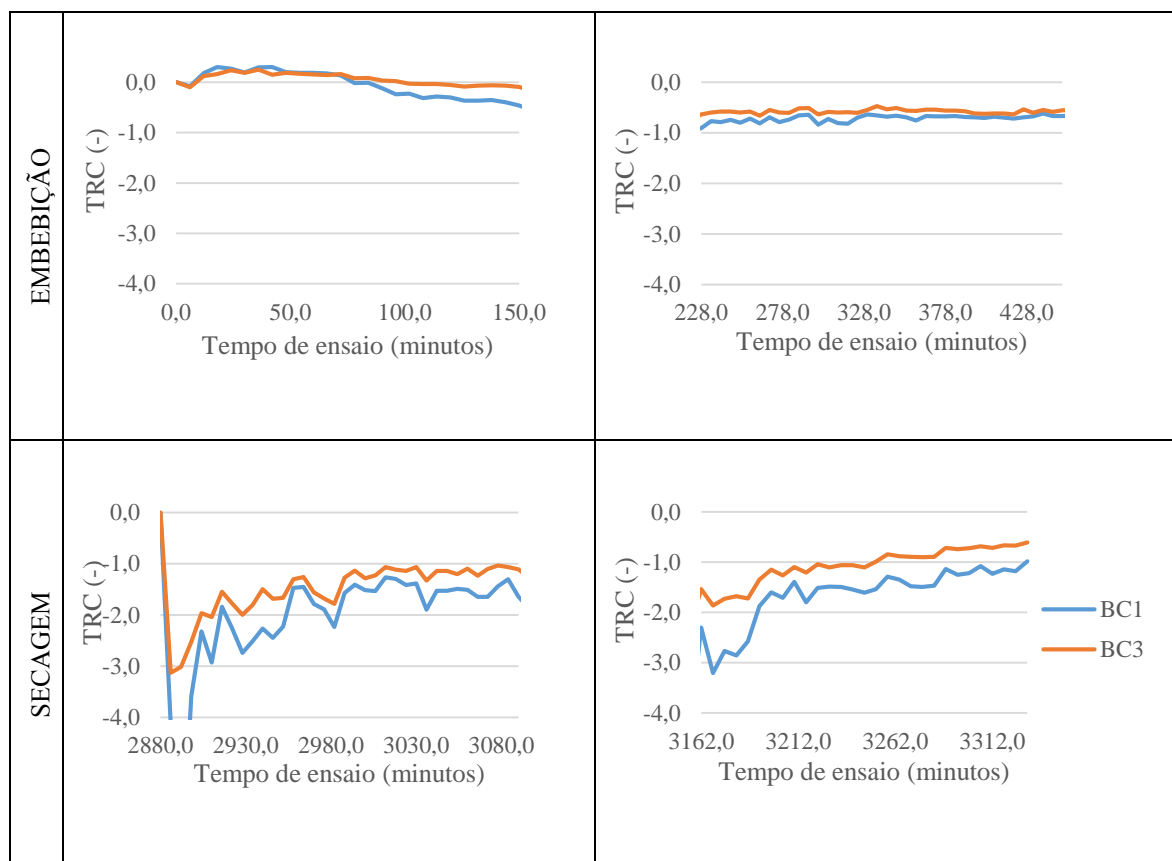
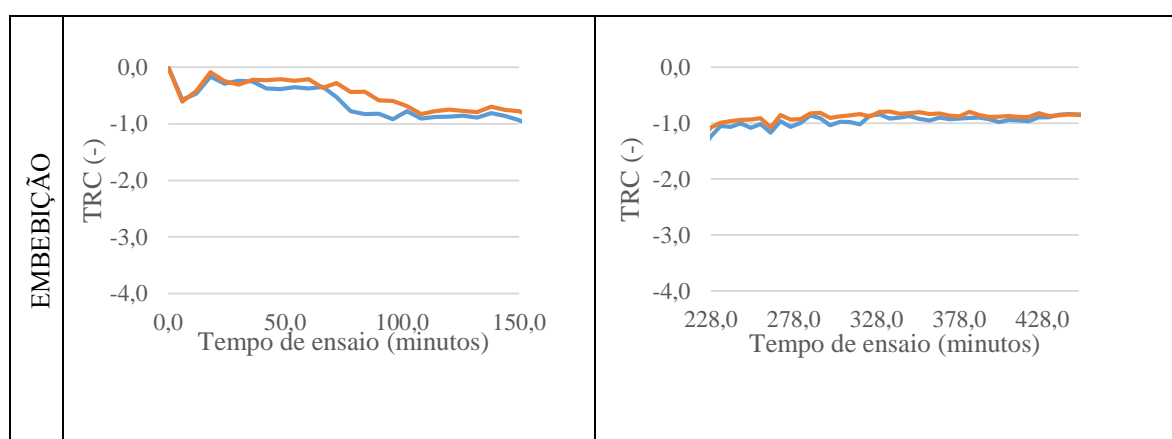


Figura 4.29 - Função de contraste TRC em função do tempo para os provetes BC1 e BC3 para o procedimento 1-A



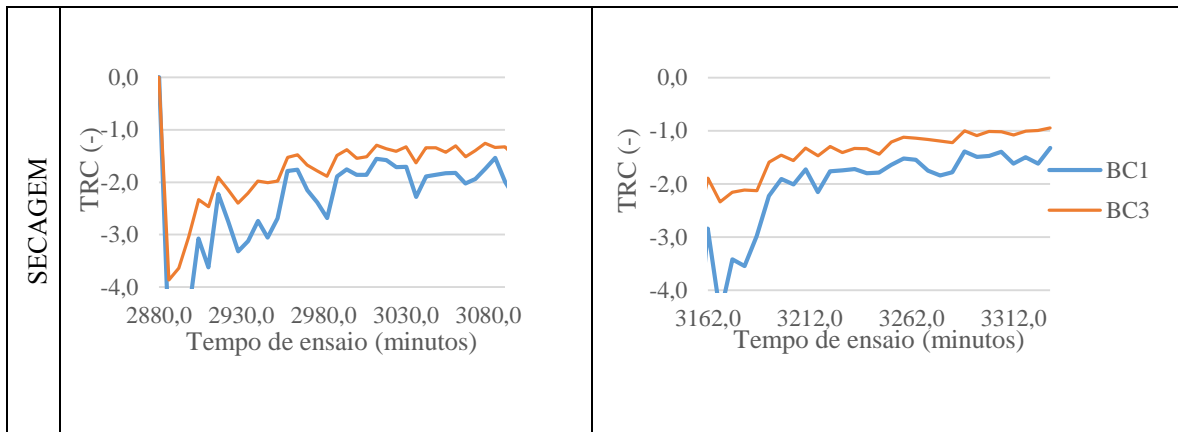


Figura 4.30 - Função de contraste TRC em função do tempo para os provetes BC1 e BC3 para o procedimento 1-B

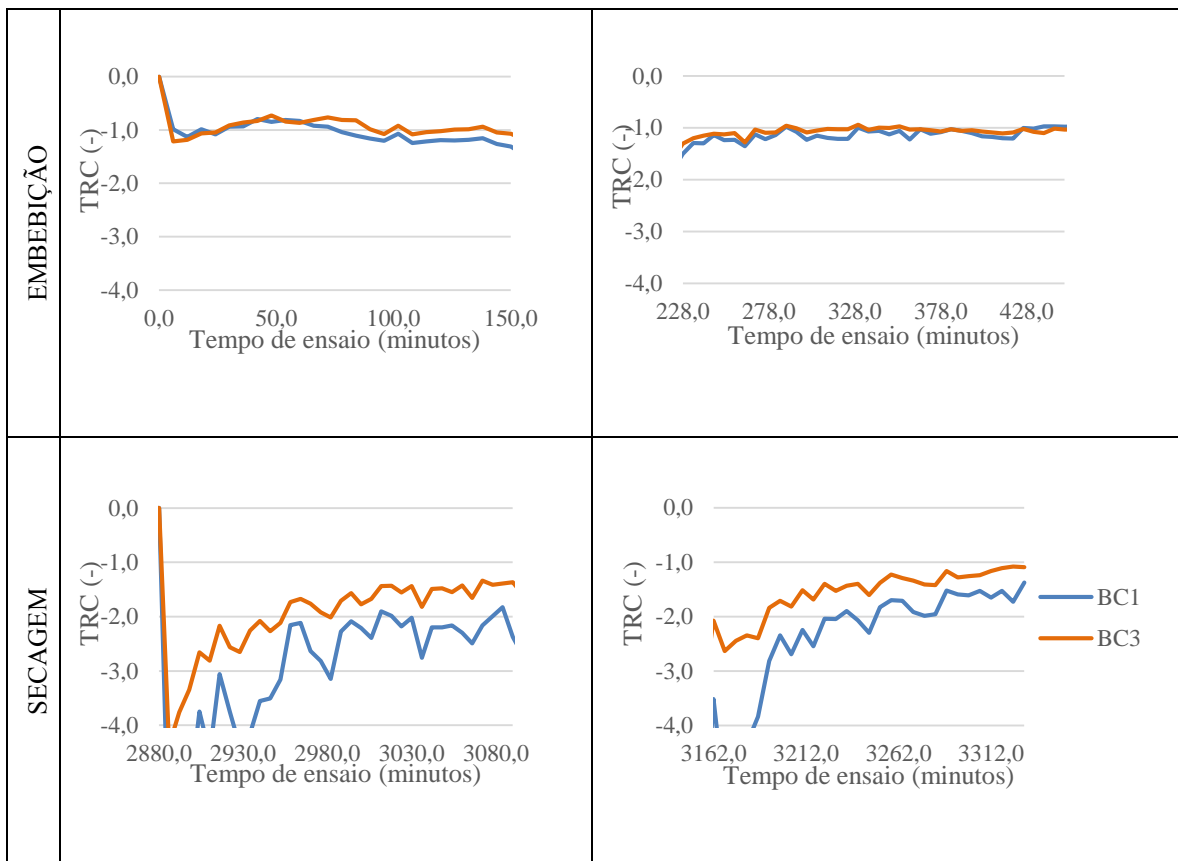


Figura 4.31- Função de contraste TRC em função do tempo para os provetes BC1 e BC3 para o procedimento 2

Os valores de TRC no procedimento 1-A apresenta resultados ligeiramente diferentes dos procedimentos 1-B e 2, porque como são calculadas médias e a caixa da zona húmida ainda tem heterogeneidades térmicas, a diferença de valores face à zona seca são atenuadas. Nos procedimentos

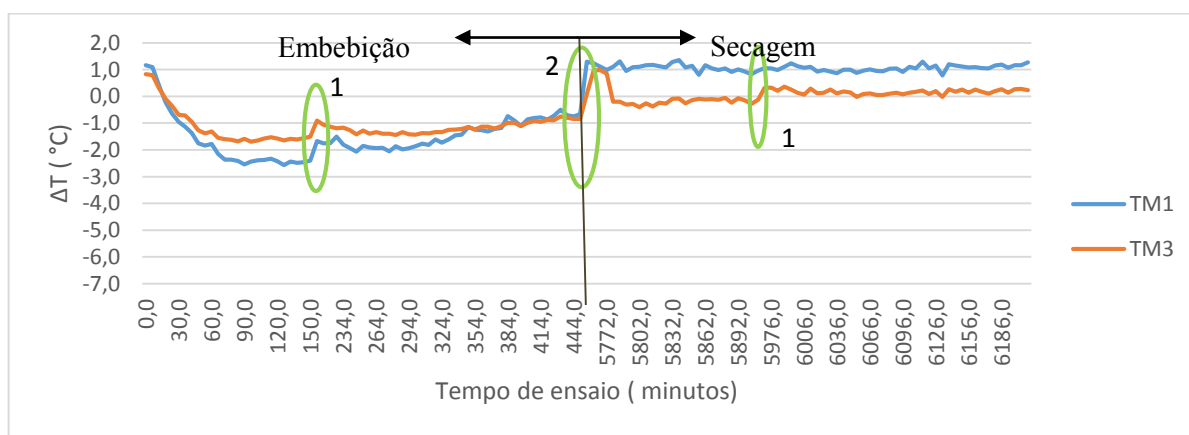
1-B e 2, à medida que a fase de embebição decorre, este valor diminui, verificando-se assim que a humidade aumenta nos provetes, ou seja, o valor da zona molhada diminui relativamente ao valor da zona seca (equação 2.8 no § 2.1.6.4). No entanto, na fase final da secagem, este valor aumenta ligeiramente, uma vez que toda a caixa da zona molhada está homogénea, ou seja, o diferencial da zona molhada com a zona seca aumenta. A diferença entre o provete impermeabilizado BC3 e não impermeabilizado BC1 é mais evidente na fase de secagem, em qualquer um dos procedimentos. Verifica-se que a secagem é mais lenta no provete impermeabilizado BC3, por isso tem maiores valores de TRC. Na fase de embebição os valores são semelhantes, o que demonstra que, nesta fase, não é muito relevante o facto de o provete estar impermeabilizado.

Analisando as funções de contraste TC e TRC verifica-se que os comportamentos são similares, embora em alguns casos os sentidos sejam contrários. No entanto, aquela que melhor expressa a visualização da humidade nos provetes de betão celular autoclavado é a função de contraste TC.

4.3.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS PROVETES DE TIJOLO MACIÇO

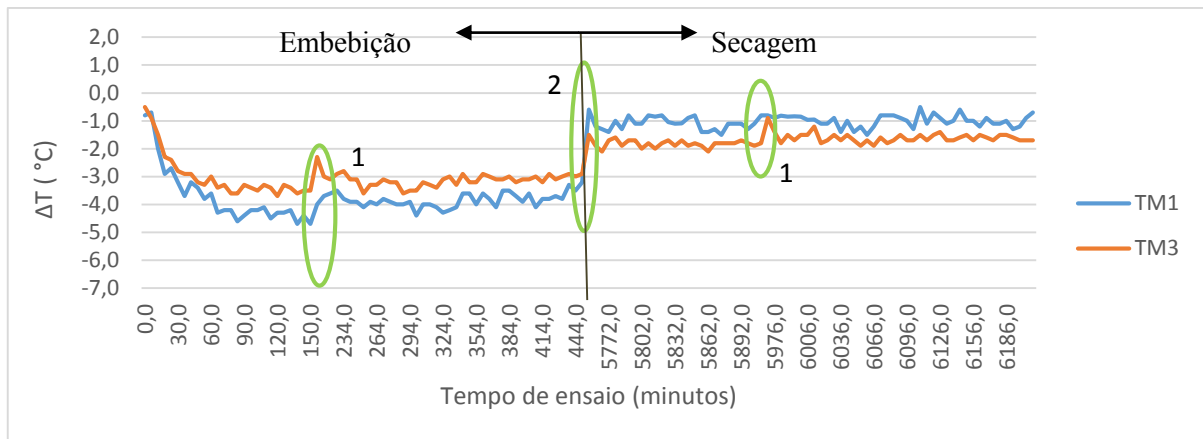
Os gráficos das figuras 4.32 a 4.40 mostram o valor do delta-T, TC e TRC em função do tempo dos provetes de tijolo cerâmico maciço, para os procedimentos 1-A, 1-B e 2.

A figura 4.32 mostra os valores do delta-T obtidos ao longo das fases de embebição e secagem para o procedimento 1-A, a figura 4.33 para o procedimento 1-B e a figura 4.34 para o procedimento 2.



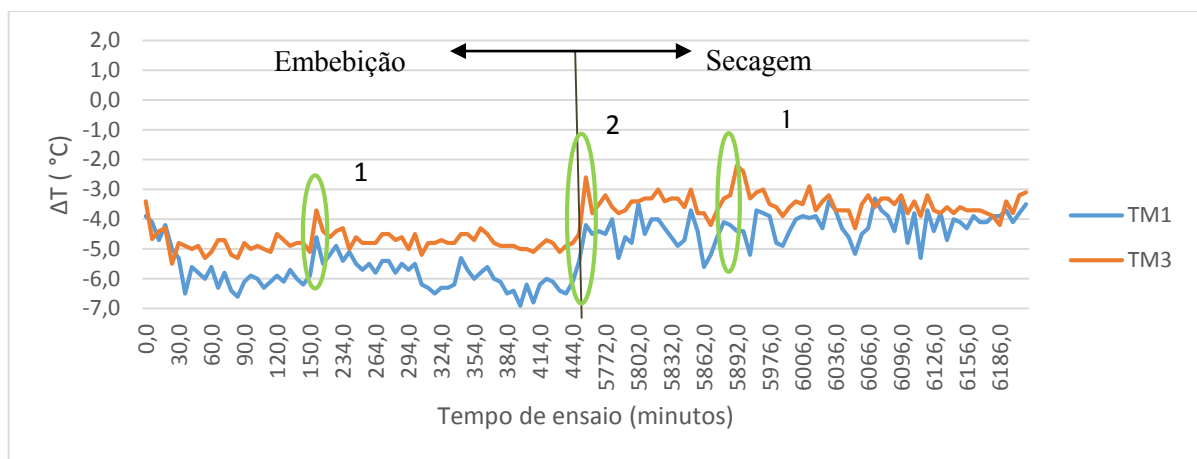
1 - Paragem durante a hora de almoço; 2 - Paragem de um dia para o outro

Figura 4.32 - Variação do delta-T em função do tempo para os provetes TM1 e TM3 para o procedimento 1-A



1 - Paragem durante a hora de almoço; 2 - Paragem de um dia para o outro

Figura 4.33 - Variação do delta-T em função do tempo para os provetes TM1 e TM3 para o procedimento 1-B



1 - Paragem durante a hora de almoço; 2 - Paragem de um dia para o outro

Figura 4.34 - Variação do delta-T em função do tempo para os provetes TM1 e TM3 para o procedimento 2

Para os três procedimentos pode-se verificar que houve um ligeiro aumento no valor absoluto de delta-T, sendo menor no procedimento 2. Na fase inicial da secagem, o valor absoluto de delta-T diminuiu, mantendo-se posteriormente contante. Esta diminuição mostra que os provetes estão totalmente húmidos. Já na parte final da secagem, dá-se novamente uma ligeira diminuição deste valor absoluto, começando os provetes a secar. Porém, o facto do procedimento 2 utilizar os valores máximos e mínimos dos provetes, faz com que as diminuições dos valores absolutos de delta-T não sejam tão acentuadas.

As figuras 4.35, 4.36 e 4.37 demonstram os valores da função de contraste TC obtidos ao longo das fases de embebição e secagem para o procedimento 1-A, 1-B e 2.

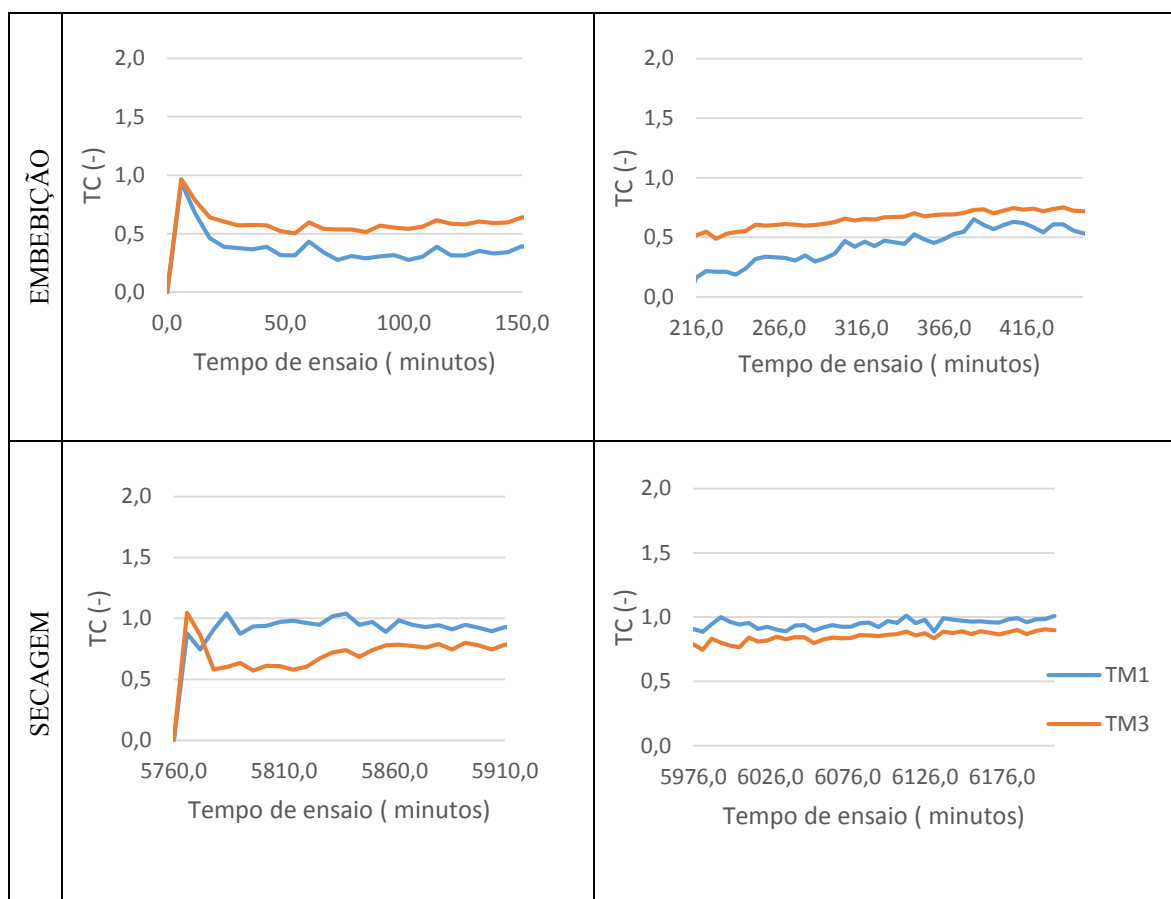
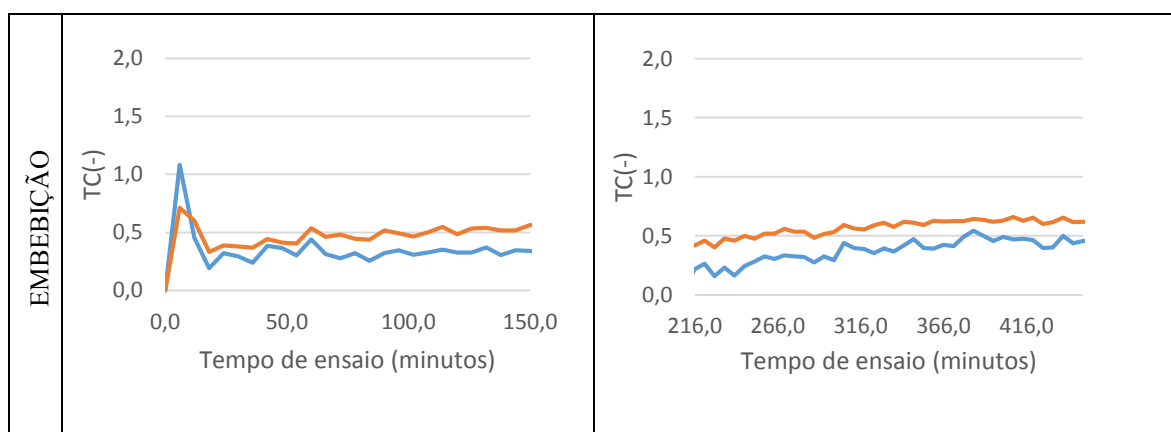


Figura 4.35 - Função de contraste TC em função do tempo para os provetes TM1 e TM3 para o procedimento 1-A



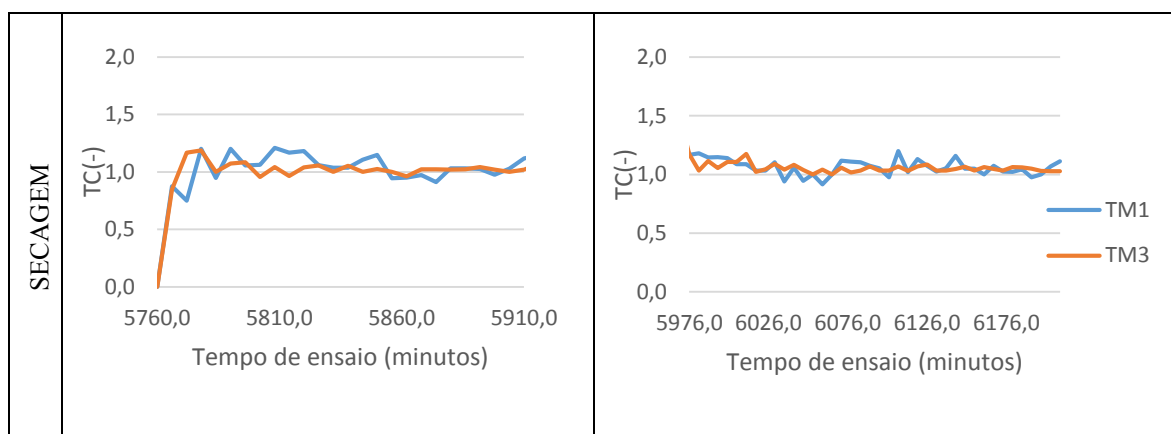


Figura 4.36 - Função de contraste TC em função do tempo para os provetes TM1 e TM3 para o procedimento 1-B

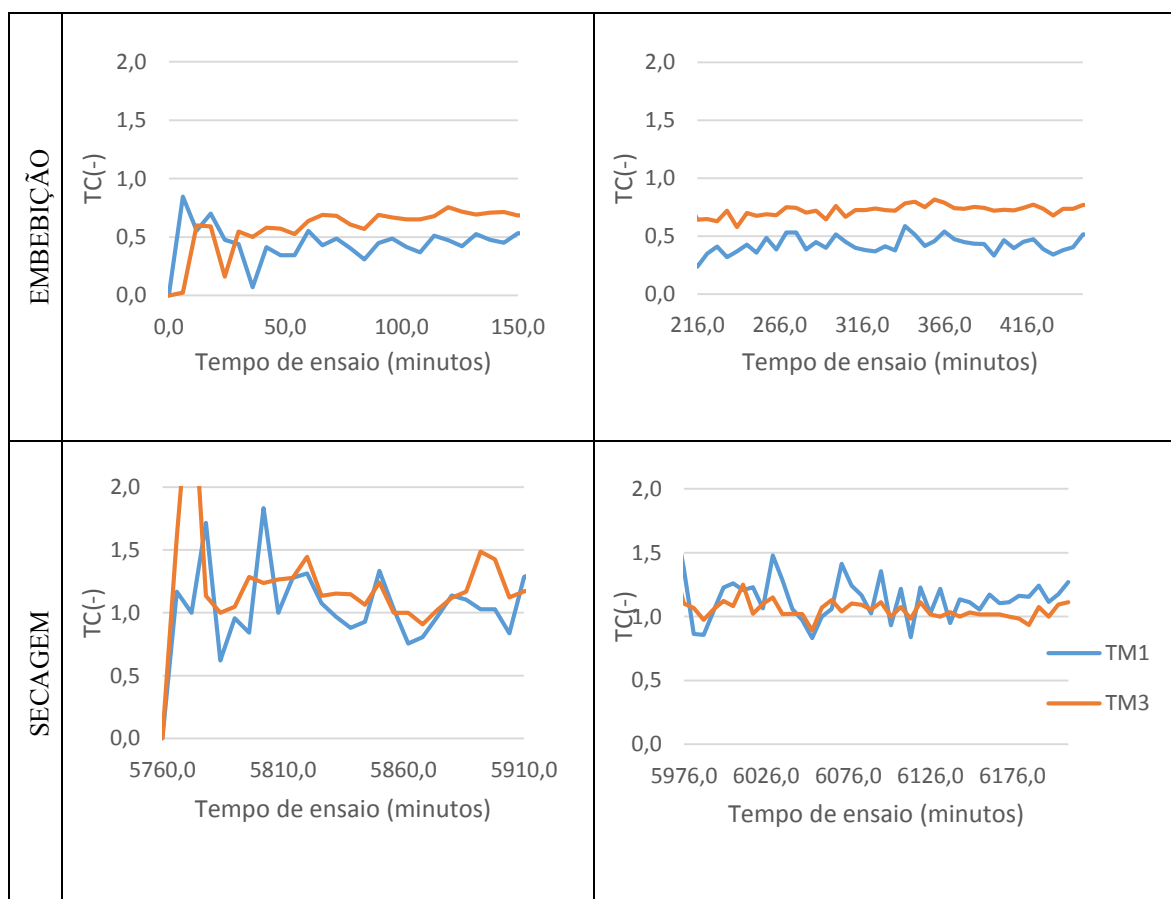


Figura 4.37 - Função de contraste TC em função do tempo para os provetes TM1 e TM3 para o procedimento 2

Note-se que no começo da embebição, e também no começo da secagem embora de forma menos evidente, a função de contraste atinge o seu pico máximo, o qual coincide com os momentos em que a

humidade começa a ser detetada nos provetes e melhor se visualiza a humidade (na fase de secagem), tal como tinha sido descrito por Pavón (2015).

Os valores de TC mostram que a humidade começa a estar presente nos provetes, com o aumento do seu valor, e posteriormente dá-se uma ligeira diminuição, uma vez que a humidade nos provetes começa a aumentar, ou seja, o valor do diferencial da área molhada com a área molhada inicial diminui (equação 2.7 do § 2.1.6.4). Na fase de secagem, o valor de TC mantém-se constante, ou seja, a humidade está sempre presente no provete até ao fim do ensaio.

As figuras 4.38, 4.39 e 4.40 demonstra os valores da função de contraste TRC obtidos ao longo das fases de embebição e secagem para o procedimento 1-A, 1-B e 2. Tal como com o TC, também neste caso os picos são obtidos no início da fase de embebição e de secagem, como descrito por Pavón (2015).

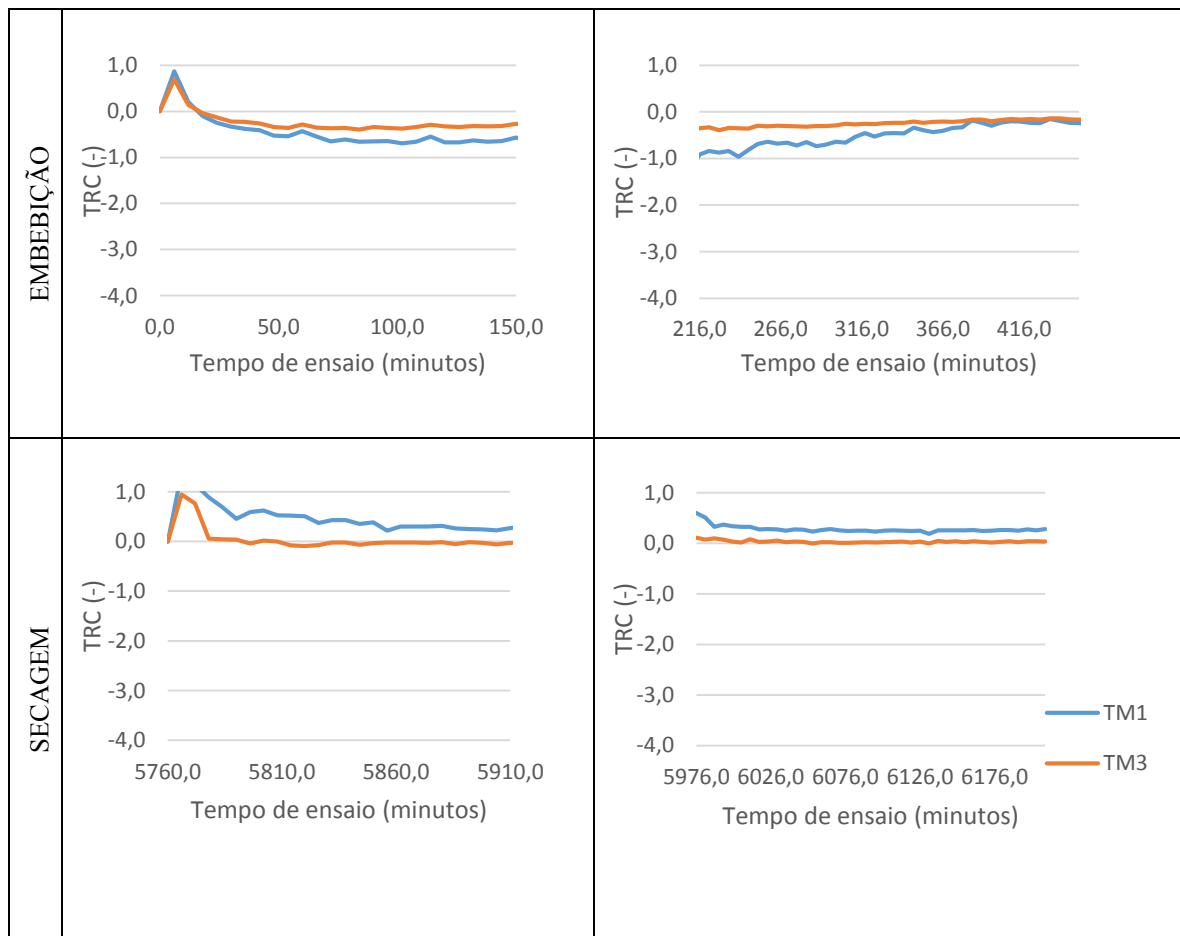


Figura 4.38 - Função de contraste TRC em função do tempo para os provetes TM1 e TM3 para o procedimento 1-A

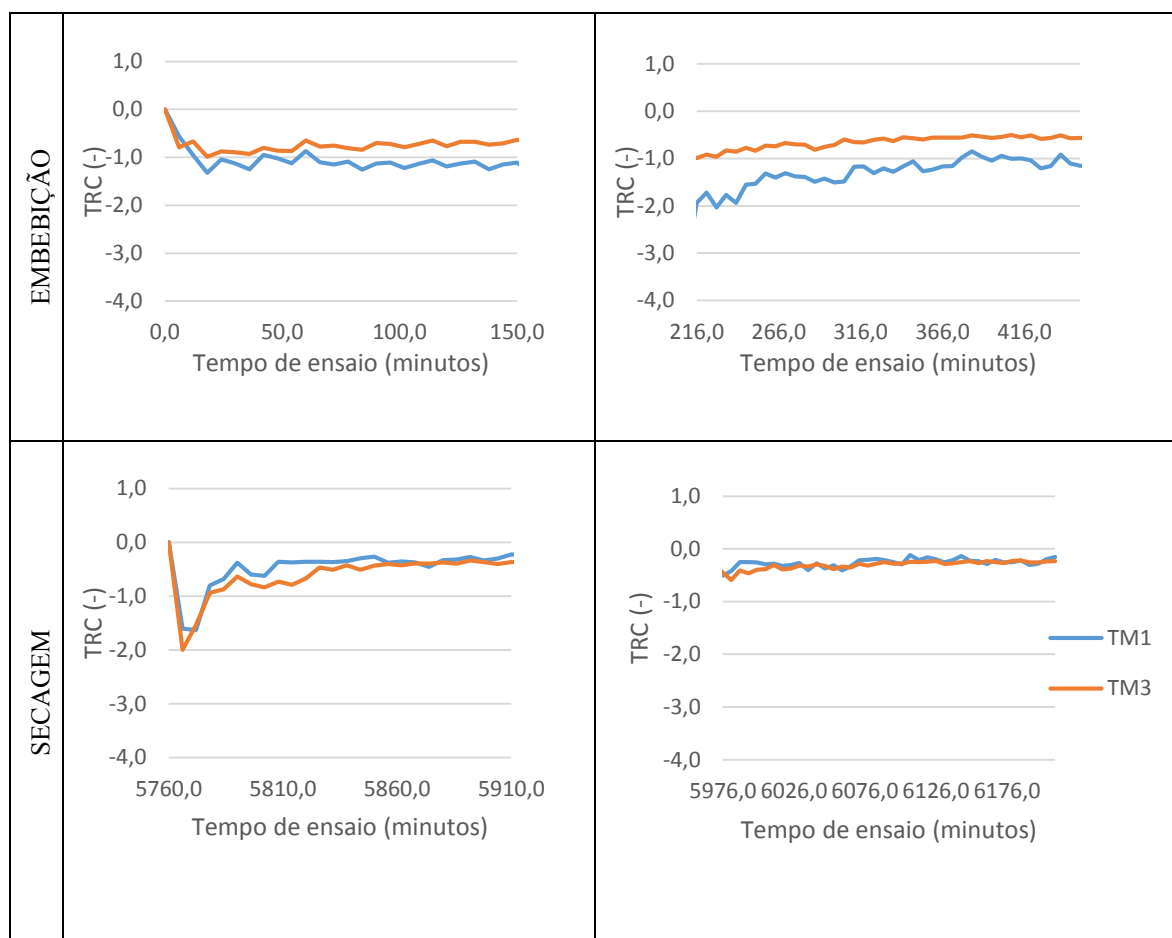
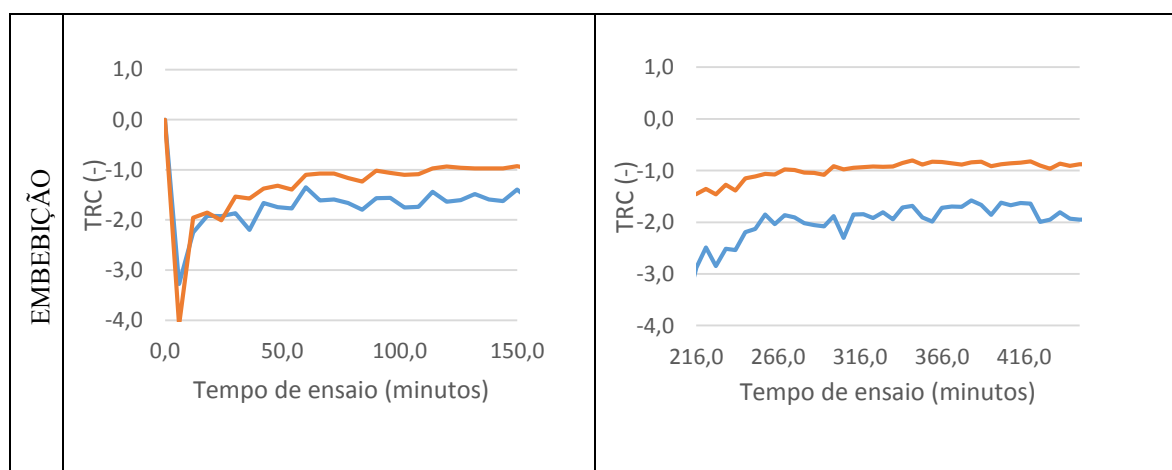


Figura 4.39 - Função de contraste TRC em função do tempo para os provetes TM1 e TM3 para o procedimento 1-B



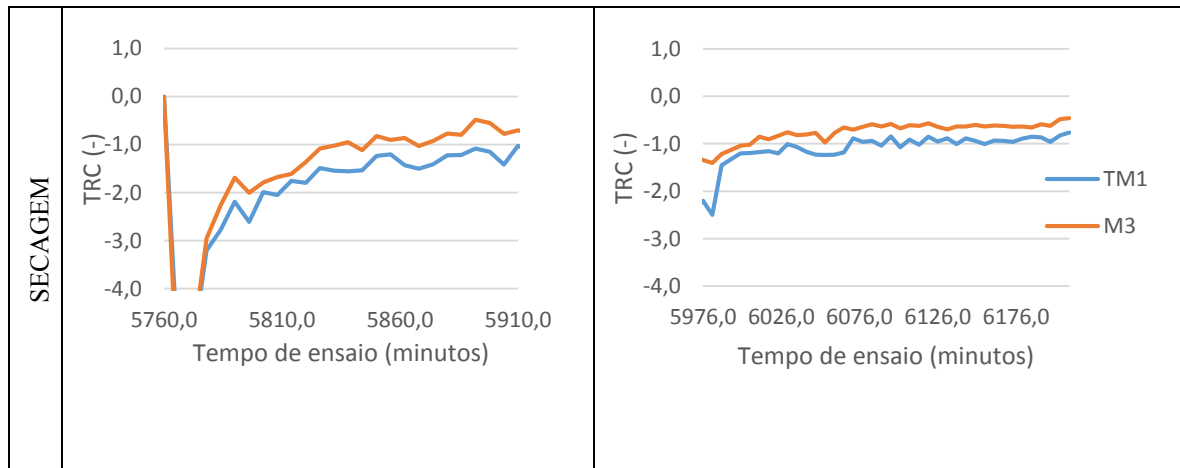


Figura 4.40- Função de contraste TRC em função do tempo para os provetes TM1 e TM3 para o procedimento 2

4.4. ENSAIO TIPO III

Os gráficos das figuras 4.41 e 4.43 mostram o valor do delta-T, TC e TRC em função do tempo dos provetes de madeira M4, considerando o procedimento 3.

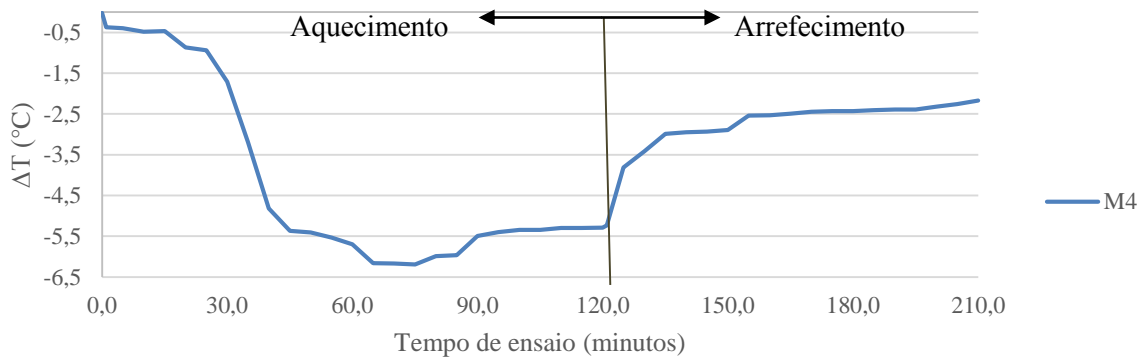


Figura 4.41 - Variação do delta-T em função do tempo para o provete M4 para o procedimento 3

A figura 4.41 mostra que no início ciclo de aquecimento, o valor absoluto de delta-T aumenta acentuadamente tendendo a estabilizar no final deste ciclo. No início do ciclo de arrefecimento, dá-se uma diminuição do valor absoluto de delta-T, tendendo a estabilizar no final deste ciclo. Verifica-se também que o espaço de tempo em que a humidade começa a ser visível na fissura é a partir dos 15 minutos (figura 4.42), uma vez que, o aumento acentuado do valor absoluto de delta-T verifica-se a partir desse momento.

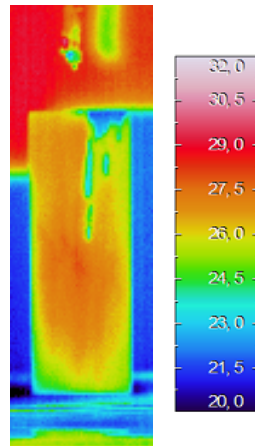


Figura 4.42 - Procedimento 3 no provete M4 aos 15 minutos

A figura 4.43 demonstra os valores das funções de contraste TC e TRC obtidos ao longo da fase de embebição no ciclo de aquecimento para o procedimento 3. Verifica-se que no início deste ciclo tanto o valor de TC como o valor de TRC diminuem acentuadamente tendendo a estabilizar no final deste ciclo. O valor máximo de TC e TRC coincidem com o espaço de tempo em que a humidade começa a ser visível na fissura (figura 4.42). Os valores de TC e TRC mantêm-se constantes porque a humidade continua visível na fissura até ao final do ensaio.

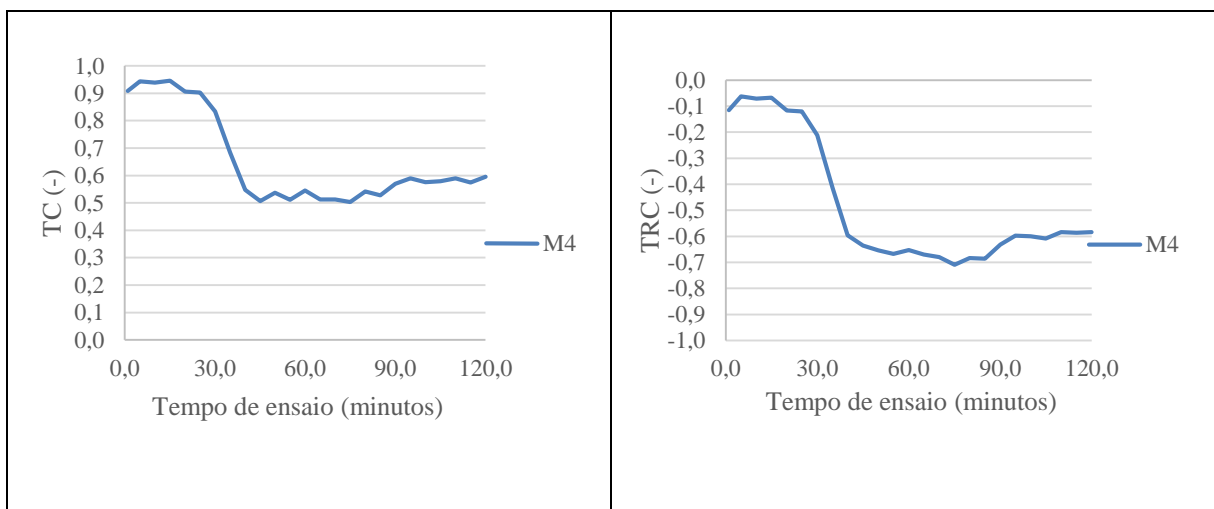


Figura 4.43 - Funções de contraste TC e TRC em função do tempo para o provete M4 para o procedimento 3 na fase de aquecimento

Bauer et al. (2015) analisou diferentes fissuras em placas de argamassa (§ 2.2.7) e concluiu que as funções de contraste têm o seu pico máximo coincidente com o momento em que melhor se observa o defeito. O mesmo pode-se concluir através da figura 4.43, em que as funções atingem o seu pico máximo no momento em que a humidade começa a ser visível na fissura [17].

4.5. ENSAIO TIPO IV

Os gráficos das figuras 4.45 e 4.47 mostram o valor do delta-T, TC e TRC em função do tempo dos provetes de madeira M4.

De forma a retirar os valores corretos do local da fissura e não dos veios da madeira, a figura 4.44 mostra a metodologia utilizada. A figura 4.45 mostra os valores do delta-T obtidos ao longo do ciclo de aquecimento-arrefecimento para o procedimento 3.

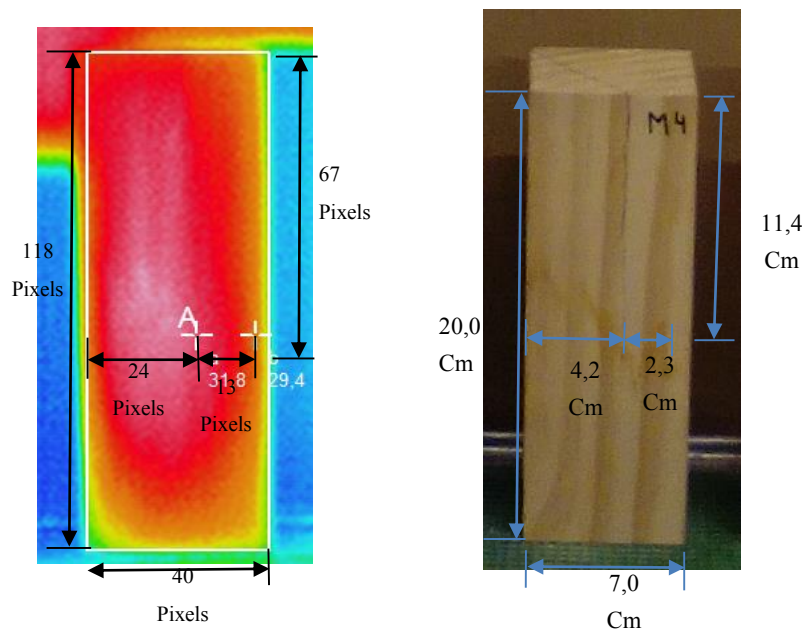


Figura 4.44 - Método utilizado na conversão das medidas em centímetros para pixels

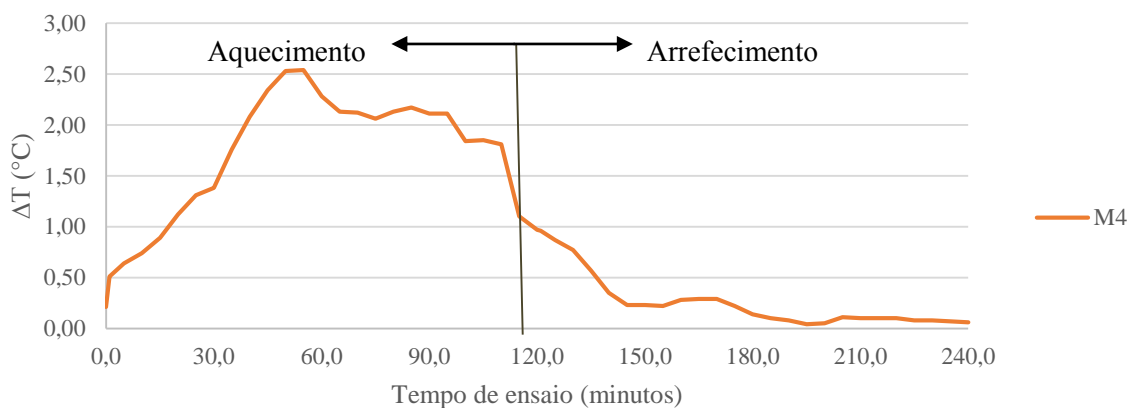


Figura 4.45 - Variação do delta-T em função do tempo para o provete M4 para o procedimento 3

Verifica-se que no início ciclo de aquecimento, o valor de delta-T aumenta acentuadamente tendendo a estabilizar no final deste ciclo. No início do ciclo de arrefecimento, dá-se uma diminuição do valor de delta-T, tendendo a estabilizar no final deste ciclo. Verifica-se ainda que o espaço de tempo em que a fissura é mais visível foi aos 50 minutos (figura 4.46).

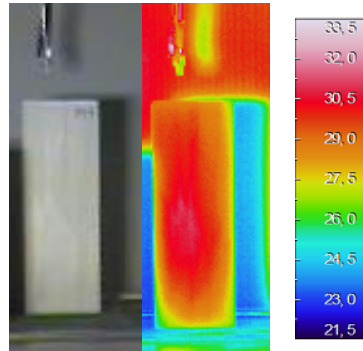


Figura 4.46 - Procedimento 3 no provete M4 aos 50 minutos

A figura 4.47 mostra os valores das funções de contraste TC e TRC obtidos ao longo do ciclo de aquecimento para o procedimento 3. Verifica-se que no início deste ciclo tanto o valor de TC como o valor de TRC aumentam acentuadamente e seguidamente esse valor diminui lentamente até ao final deste ciclo. Os valores máximos de TC e TRC coincidem com o espaço de tempo em que há uma maior visibilidade da fissura (figura 4.46). Para o ciclo de aquecimento os valores máximos das funções coincidem com os valores máximos do delta-T, tal como referia Bauer et al. (2015).

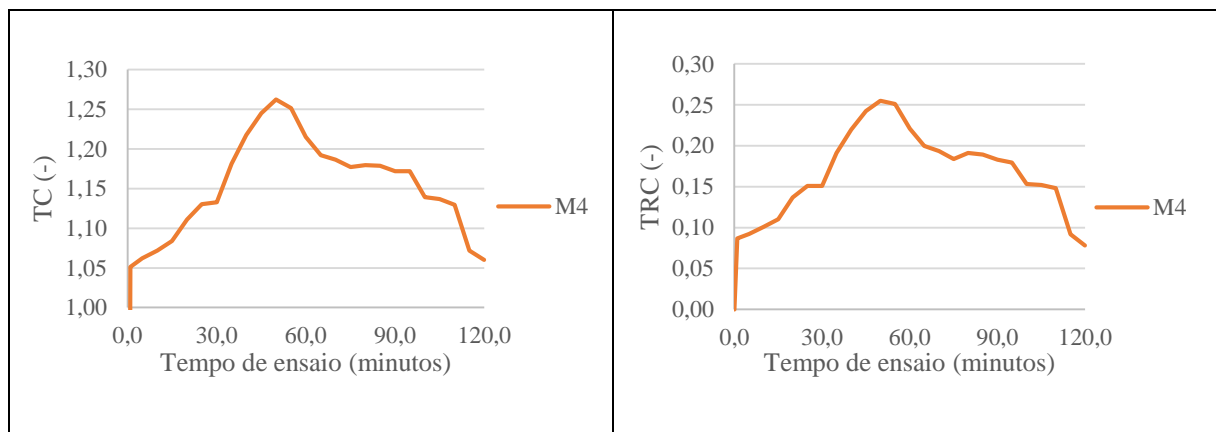


Figura 4.47 - Funções de contraste TC e TRC em função do tempo para o provete M4 para o procedimento 3 na fase de aquecimento

4.6. SÍNTESE CRÍTICA

Através da aplicação do delta-T e das funções de contraste TC e TRC foi possível analisar quantitativamente a presença da água em vários tipos de materiais.

Da análise de delta-T foi possível concluir, para qualquer fase estudada, que o aumento de delta-T em valor absoluto corresponde efetivamente ao aparecimento da humidade no provete e, o facto de este valor se manter constante mostra que a água está presente no provete.

Na análise da função de contraste TC verificou-se que o aparecimento de heterogeneidades térmicas resultantes da presença da água no provete causa um aumento do seu valor absoluto. O mesmo acontece para a função de contraste TRC. Quando o provete começa a secar, estes valores absolutos diminuem.

Através da comparação do delta-T do ensaio tipo I e do ensaio tipo II, para todos os procedimentos, foi possível concluir que a utilização da lâmpada infravermelha faz aumentar o valor de delta-T, ou seja, o fluxo de calor é mais elevado na fase II e a absorção de calor é maior na zona seca.

Através da comparação do delta-T do ensaio tipo III e do ensaio tipo IV, para todos os procedimentos, foi possível concluir que a existência de humidade no ensaio tipo III fez aumentar o valor absoluto de delta-T em cerca do dobro do valor absoluto no ensaio tipo IV. No entanto, quando a lâmpada é desligada, o decréscimo de delta-T é mais acentuado no ensaio tipo IV, uma vez que o fluxo de calor inverte o sentido e a libertação de calor é maior na zona seca/zona sem anomalia [25].

Através da comparação da função de contraste TC e TRC do ensaio tipo II e III (fases em que a humidade está presente), para todos os procedimentos, foi possível concluir que a função que melhor expressa a visualização da humidade nos provetes de betão celular autoclavado e tijolo cerâmico é a função de contraste TC, ou seja, a variação da temperatura na área da zona molhada em relação à evolução da temperatura área da zona seca e mais evidente através da aplicação da função de contraste TC.

Através da comparação da função de contraste TC e TRC do ensaio tipo III e do ensaio tipo IV, para todos os procedimentos, os valores são semelhantes para ambas as fases, no entanto, no ensaio tipo III quando a humidade começa a detetar-se, o valor das funções de contraste aumentam e estabilizam, já no ensaio tipo IV nas funções de contraste o seu pico máximo coincide com o momento de maior visibilidade da fissura, posteriormente esse valor diminui e estabiliza no final do processo.

O facto da lâmpada infravermelha incidir mais na parte inferior do provete, provoca um aumento de temperatura nessa zona, que vai influenciar nos resultados iniciais de cada ensaio, uma vez que a parte inferior do provete corresponde à zona molhada, que deveria ser a zona com temperatura inferior. O que não se verifica nos primeiros minutos dos ensaios.

Bauer et al. (2015), utiliza as funções delta-T e as funções de contraste TC e TRC para estudar o destacamento cerâmico e a fissuração em placas de argamassa (§ 2.2.7). Comparando os seus resultados com os obtidos nesta dissertação, é possível afirmar que tanto o delta-T como as funções de contraste atingem o seu pico máximo quando a humidade começa a ser detetada no provete.

5

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1. CONCLUSÕES FINAIS

A elaboração desta dissertação incidiu essencialmente na avaliação da humidade através da utilização da termografia de infravermelhos, recorrendo a uma análise qualitativa e quantitativa.

Tendo por base o estudo efetuado foi possível concluir:

- Através da termografia é possível determinar o nível da ascensão capilar, durante a fase de embebição e a diminuição da água à superfície, ao longo da fase de secagem. No percorrer da fase de secagem, a variação de temperatura superficial começa a ser pouco significativa, sendo mais difícil de identificar a presença de humidade utilizando a análise termográfica.
- Através da análise de delta-T e das funções de contraste TC e TRC foi possível identificar as diferenças entre os provetes não impermeabilizados, os provetes impermeabilizados, os provetes fissurados e os provetes fissurados e impermeabilizados.
- Através da análise das funções de contraste TC e TRC verifica-se que é possível quantificá-las, principalmente quando o provete é aquecido (utilização de uma lâmpada infravermelha). Para os diferentes procedimentos (procedimento 1-A, 1-B, 2 e 3) adotados foi possível verificar-se a similaridade dos valores.
- Quando comparando os ensaios tipo I e II, foi possível concluir que, o facto de se utilizar uma lâmpada infravermelha para aquecer os provetes (ensaio tipo II) aumenta consideravelmente os valores de delta-T e facilita a identificação da presença de humidade.
- Quando comparando os ensaios tipo III e IV foi possível concluir que o facto de existir humidade no provete facilita a identificação da anomalia.
- Através da análise de delta-T e das funções de contraste TC foi possível identificar os momentos em que a humidade começava a parecer nos provetes.
- Comparando os três critérios de avaliação quantitativa verificou-se que o delta-T parece ser o mais adequado para a avaliação da presença de humidade.
- Através dos ensaios experimentais, foi possível concluir que a termografia de infravermelhos é um instrumento com enorme capacidade para detetar a presença de humidade em materiais.

5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A termografia de infravermelhos é uma técnica em expansão e com grande diversidade de aplicação, uma vez que não implica o contacto com o objeto em estudo. Tornando-se assim um enorme potencial de investigação para trabalhos futuros.

Nesta área de aplicação da termografia de infravermelhos à avaliação de patologias associadas à humidade e à fissuração existe ainda muito trabalho que deve ser realizado.

Em particular, seria interessante efetuar os mesmos ensaios termográficos para diferentes condições ambiente, e verificar se essas influenciam a análise dos termogramas. Ou até mesmo, efetuar uma análise de sensibilidade, fazendo variar as condições ambiente, a distância da câmara termográfica ao objeto em estudo, a luminosidade, a emissividade para o mesmo material, entre outros.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Braga Filho, Washington. *Transmissão de calor*. Pioneira Thomson Learning, São Paulo, 2004.
- [2] Holman, Jack Philip. *Heat transfer*. McGraw Hill, New York, 1997.
- [3] Kreith, Frank. *Princípios de transferência de calor*. Pioneira Thomson Learning, São Paulo, 2003.
- [4] Incropera, Frank P., DeWitt, David P. *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa (5.ª edição)*. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 2003.
- [5] Barreira, Eva. *Aplicação da Termografia ao Estudo do Comportamento Higrotérmico dos Edifícios*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2004.
- [6] Henriques, F.M.A. *Comportamento Higrotérmico de edifícios*. Universidade nova de Lisboa, 2011.
- [7] Perin, A. *Desenvolvimento de um Equipamento para Medição de Emissividade*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2009.
- [8] Hart, J. M. *A practical guide to infrared thermography for building surveys*. Construction Research Communications Ltd. BRE, UK, 1991.
- [9] Matias, Luís Manuel Cordeiro. *Avaliação do desempenho térmico de proteções refletantes aplicadas em coberturas inclinadas*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Lisboa, 2002.
- [10] Veratti, Atílio Bruno. *Sistema Básico de Inspeção Termográfica*. <http://www.ebah.pt/content/ABAAAAmiIAB/sistema-basico-inspecao-termografica>. 27 de Março de 2015.
- [11] Gaussorgues, G. *La thermographie infrarouge – Principes, Technologies, Applications*. 4ª Édition. Edition TEC & DOC, Paris, 1991.
- [12] Infratemp – Soluções para Processos Industriais (2010). *Termometria Infravermelha – Teoria Básica*. [Http://www.infratemp.com.br/assets/uploads/como-funciona/infratemp-como-funciona-20140113134539-1412011090301.pdf](http://www.infratemp.com.br/assets/uploads/como-funciona/infratemp-como-funciona-20140113134539-1412011090301.pdf). 25 de Março de 2015.
- [13] Dinis, B. *Termografia Aplicada à física das Construções*. Monografia para obtenção do grau de Licenciamento, Universidade Fernando Pessoa, Porto, 2009.
- [14] Ibarra-Castaneda, C., et al. *Ultrasonic and advanced methods for nondestructive testing and material characterization*. In *Active infrared thermography techniques for the nondestructive testing of materials*, ISBN 978-981-270-409-2, p.325-348., World Scientific Publishing, USA, 2007.
- [15] Edis, E., Flores-Colen, I., & De Brito, J. *Passive thermographic detection of moisture problems in façades with adhered ceramic cladding*. *Construction and Building Materials*, 51, 2014, p.187–197.
- [16] Rosina, E., Ludwig, N. *Optimal thermographic procedures for moisture analysis in building materials*. In: *Proceedings of Society of Photographic Instrumentation Engineers (SPIE)*, 1999, vol.3827, p.22-33.
- [17] Bauer, E., Castro, E.K., Pavon, E., Oliveira, A.H.S. *Criteria for application and identification of anomalies on the facades of buildings with the use of passive infrared thermography*. In: *1st International symposium on building pathology*, 2015, p.12, Porto, Portugal.

- [18] Freitas, J. G., Carasek, H., Cascudo, O. *Utilização de termografia infravermelha para avaliação de fissuras em fachadas com revestimento de argamassa e pinturas*. Ambiente Construído, v.14,n. 1, 2014, p. 57-73.
- [19] Crespo, J. De La P., Rodriguez, F. J. R. *Inspección termográfica de fachadas de edificios. Comentarios a la norma europea en 13187*. Libro de actas del Congreso Ibérico de aislamiento térmico y acústico: CIATER, 15 e 16 de junho de 2004, p.206-214, Gijón: Servicio de Publicaciones, Gijón.
- [20] Martínez, L., Castillo, A., Martínez, E., Castilhote, M. *Metodología para la intervención en elementos históricos: el caso de la espadana del convento de Nuestra señora de la Consolación (Alcalá de Henares-Madrid-Espana)*. Informes de la Construcción, v. 65, n. 531, 2013, p. 355-366.
- [21] Bauer, E., Pavón, E., Oliveira, A. H. S., Castro, E. K. *Análisis de parámetros cuantitativos de termografia infrarroja para la evaluación de fachadas de revestimientos cerámicos*. In: 5to Congreso de patologia y rehabilitación de edeficios, 2015, Porto, Portugal, p. 6, Porto, Portugal.
- [22] Jadin, M. S., TAIB, S. *Recent progress in diagnosing the reliability of electrical equipment by using infrared thermography*. Infrared Physics & Technology, v. 55, n. 4, 2012, p. 236-245.
- [23] Maldague, X. *Applications of infrared thermography in nondestructive evaluation*. In Trends in optical non-destructive testing and inspection, 2000, Elsevier, Amsterdam, New York p. 591-609.
- [24] Valilov, V. *Noise - limited thermal/infrared nondestructive testing*. NDT & E INTERNATIONAL, v. 61, p. 2014, 16-23.
- [25] Maldague, X. *Applications of infrared thermography in nondestructive evaluation*. Trends in optical nondestructive testing. Quebec, Canada, 2000, p. 591-609, Canada.
- [26] Wild, W. *Application of Infrared Thermography in Civil Engineering*. Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, vol. (13), Edition 4, 2007, pp. 436-444.
- [27] Córias, V. *Inspeções e Ensaio na Reabilitação de Edifícios*, Lisboa: IST Press, 2006, p. 330 – 333.
- [28] ASTM. *ASTM C1153 - 10 Standard practices for location of wet insulation in roofing systems using infrared imaging*. American Society for Testing and Materials (ASTM) International, 2010.
- [29] Li, Z. J. et al. - *Application of infrared thermography technique in building finish evaluation*. *Journal of Nondestructive Evaluation*. ISSN 0195-9298. Vol. 19, n. ° 1, 2000, p. 11-19.
- [30] Santos, C. *Aplicação laboratorial da análise termográfica para visualização da absorção capilar e da secagem de um provete de betão celular autoclavado*. Relatório 05/02 – NCCt, LNEC, Lisboa, 2002.
- [31] Santos, C., Matias, L. *Aplicação laboratorial da análise termográfica para visualização da absorção capilar e da secagem de um provete de parede de tijolo cerâmico furado*. Relatório 144/02 – NCCt, LNEC, Lisboa, 2002.
- [32] Santos, C., Matias, L. *Aplicação laboratorial da análise termográfica para visualização da absorção capilar e da secagem de uma parede de alvenaria de blocos de betão de argila expandida*. Relatório 37/2003 – NRI, LNEC, Lisboa, Fevereiro 2003.
- [33] Matias, L. *Ensaio de capilaridade e análise termográfica para visualização da secagem de um murete de alvenaria de pedra*. Relatório 22/2007 – NRI, LNEC, Lisboa, 2007.
- [34] Kominsky, J. R., Luckino, J. S., Street, N. H., Martin, T. F., *Passive Infrared Thermography – A Qualitative Method for Detecting Moisture Anomalies in Building Envelopes*. Air and Waste Manegement Association-Publications, 2006.

- [35] Barreira, E., Freitas, V. *Evaluation of Building materials using Infrared Thermography*. *Construction and Building Materials*, 21, 2007, p. 218-224, Elsevier.
- [36] NEC Avio, *Thermo Tracer TH9100 Series Operation Manual*, NEC Avio Infrared Technologies Co., Ltd., Edição 1, Japão, 2007.
- [37] <http://www.brasferreira.com/granitos.html#cinza>. 29 de Março de 2015.
- [38] Kumaran, M.K., *Heat, ai rand moisture transfer in insulated envelope parts – task 3: Material Properties*. Laboratorio Bouwfysica, Belgica, 1996.
- [39] Nunes, Â. *Inercia térmica do Betão – Cimento e a eficiência energética dos edifícios*. Jornadas da construção em cimento, 30 de março de 2011, Lisboa, p.5-7, SECIL, Lisboa.
- [40] NEC Avio Infrared Technologies Co., Ltd - *Infrared Thermal Imager Thermo Tracer TH9100MR/WR*. <http://www.infrared.avio.co.jp/en/products/ir-thermo/lineup/th9100mr-wr/index.htm>.

ANEXO A
CARACTERÍSTICAS DA CÂMARA TERMOGRÁFICA
THERMO TRACER TH9100 MR

Figura 5.1 - Características do Thermo Tracer TH9100 MR (adaptado de [52])

Temperatura		
Faixa de medição	Série 1	20 a 100 ° C
	Série 2	0 a 250 ° C
	Série 3 (opcional - Lentes externas)	100 a 800 ° C
		(exibe: 0 a 800 ° C)
	Série 4 (opcional - Lentes externas)	200 a 2000 ° C
		(exibe:_0 a 2000 ° C)
Resolução	Série 1	0,06 ° C (a 30 ° C, 60 Hz)
		0,02 ° C (a 30 ° C, 64 Hz)
Precisão	± 2 ° C ou °2 % da leitura, o que for maior	
Detetor	Matriz de planos não arrefecidos (microbolómetro)	
Desempenho na criação e apresentação de imagens		
Faixa espectral	8 a 14	
Resolução espacial I.F.O.V	1,2 mrad	
Alcance da focagem	30 cm ao infinito	
Campo de Visão	21,7 ° x 16,4 °	
Período de tempo	60 frames/segundo	
Visor	Visor & LCD de 9 cm a cores	
Imagem térmica	320 x 240 pixéis	
Resolução A/D	14 Bits	
Funções de medição	Executar/Congelar	
Melhoria S/N	Σ2, Σ8, Σ16, Σ32, Σ64 e filtros espacial de ligar/desligar	
Alarme	Tela de exibição e som de alarme (Ligar/Desligar)	
Intervalo de medição	Gravação em memória integrada em tempo real: 1/60 a 3600 intervalo de segundos	
Correção de emissividade	Previsto (0,10 a 1,00). Tabela de emissividade prevista	
Correção temperatura envolvente	Previsto (incluindo intervalo NUC)	
Configuração do utilizador	Pré-registo de configuração ambiente (max. 10 configurações)	
Compensação de fundo	Previsto	
Correção ambiente	Previsto	
Funções automáticas	Totalmente automáticas (nível, sentidos, foco)	
	Nível de traço, controlo de ganho automático	
Funções de visor	Visualização da função da imagem térmico/visual	
	Cores de visor: cor/preto e branco, positivo/negativo	
	Gravação: 16,32, 64, 128, 256	
	Paleta de cores: arco-íris, luminosidade, brilho, ferro quente, médio, fino	
	Apresentação da banda isotérmica: máx. 4 bandas	
	Exibição de miniaturas: repetição de 12 imagens térmicas	
	Linha de perfil: X, Y perfis de linha (visualização de onda)	

	Menu Multilíngue (inglês, francês, português, alemão, italiano, japonês, coreano, russo, espanhol, chinês simplificado e chinês tradicional)
Função de processamento de imagens	Variável nível/sentido
	Indicador de temperatura multiponto (até 10 pontos)
	Correção de emissividade multiponto (até 10 pontos)
	Diferença de temperatura entre 2 pontos (Δt)
	Indicador de temperatura Máx/Min /valor de pico)
	Alarme (tela cheia ou caixa específica)
	Zoom digital: 2, 4 vezes (Executa/Congelar)
	Definição de caixa. Até 5 caixas (máx, min, média)
	Multifoco, filtro de nitidez, filtro mediano
Anotação	Texto e anotação por voz (30 segundos por imagem)
Dispositivo de armazenamento	Cartão de memória para:
	Imagem térmica in situ ou formato de arquivo BMP
	Imagem térmica in situ ou formato de arquivo JPEG
	Fusão de imagem Térmico/visual em formato de arquivo BMP
Gravação de filme	Memória em tempo real: 1664 imagens (máx. 60 Hz)
Saída de sinal de Vídeo	NTSC/PAL, sinal de vídeo composto, S-vídeo
Interfaces	IEEE1394, RS-232C Ranhura para cartão de memória
Especificações gerais	
Temperatura de funcionamento	15 a 50 ° C, 90 % HR ou menos (não condensado)
Temperatura de armazenamento	40 a 70 ° C, 90 % HR ou menos (não condensado)
Fonte de alimentação	Adaptador AC: 100 V to 240 V, DOC 7.2 V (nominal)
Consumo de energia	Aproximadamente 6 W
Choque e vibração	Choque: 294 m/seg ² (30G) (IEC60068-2-27)
	Vibração: 29.4 m/seg.
Proteção ambiente	IP54 (IEC60529)
Dimensões	Apox. 108 (W) x 113 (H) x 189 (D) mm (excluindo projeções)
Peso	1,4 Kg (excluindo bateria e LCD)
	1,7 Kg (incluindo bateria e LCD)
Acessórios Padrão	Adaptados AC, bateria (pcs), carregador de bateria, cartão de memória, alça, fita para pescoço, tampa de lente, estojo de transporte, software de visualização, manual de operação
Câmara visual	
Pixéis	0,41 Mega pixéis
Pixéis efetivos da imagem	752 (H) x 480 (V) pixéis
Campo de visão	30,1 °(H) x 22,7 °(V)
Sensibilidade	1 Lux
Distância de focagem	30 Cm ao infinito
Exposição automática	Previsto
Sinal de vídeo	NTSC/PAL

ANEXOS B

TERMOGRAMAS OBTIDOS NA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

Fase I

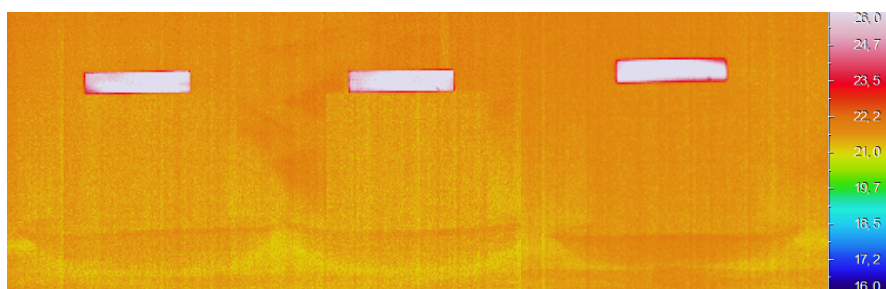


Figura 5.2 – Termograma dos provetes BB1.01, BB2.01 e BB3.01 (secos)

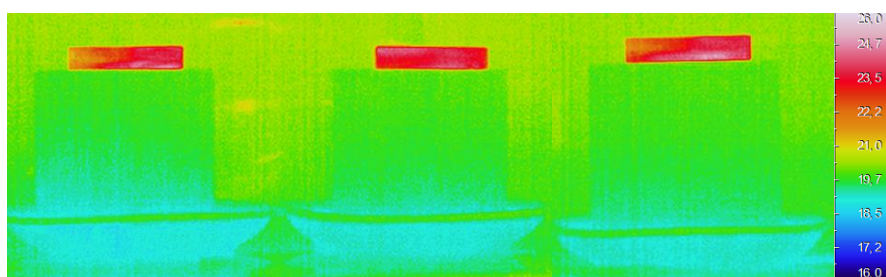


Figura 5.3 – Termograma dos provetes BB1.10, BB2.10 e BB3.10 (fase de embebição)

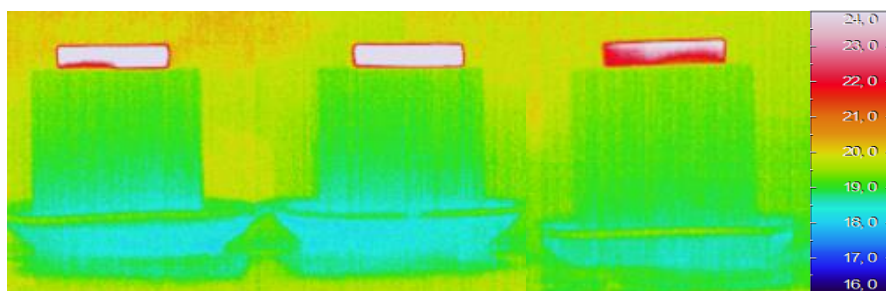


Figura 5.4 - Termograma dos provetes BB1.17, BB2.17 e BB3.17 (fase de embebição)

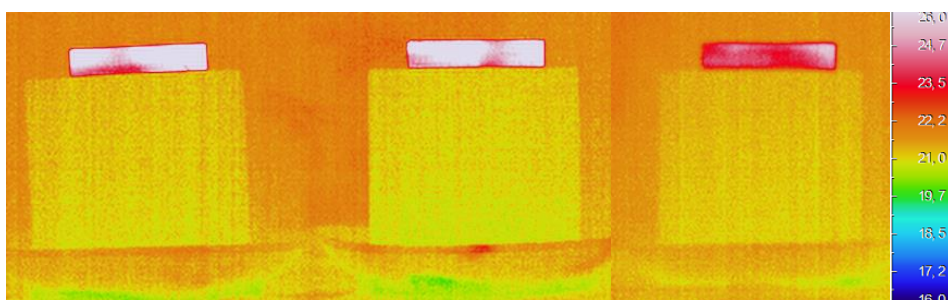


Figura 5.5 - Termograma dos provetes BB1.25, BB2.25 e BB3.25 (fase de secagem)

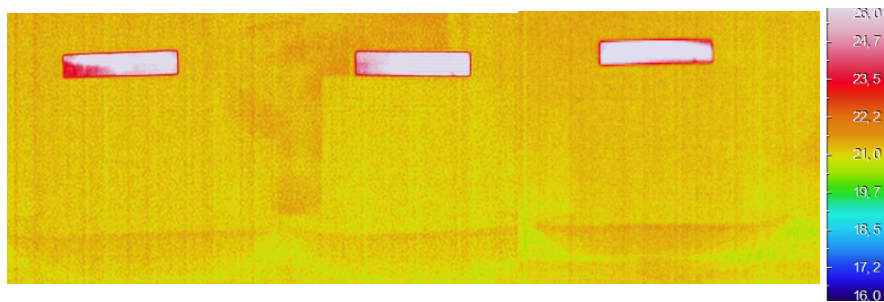


Figura 5.6 - Termograma dos provetes BB1.31, BB2.31 e BB3.31 (fase de secagem)

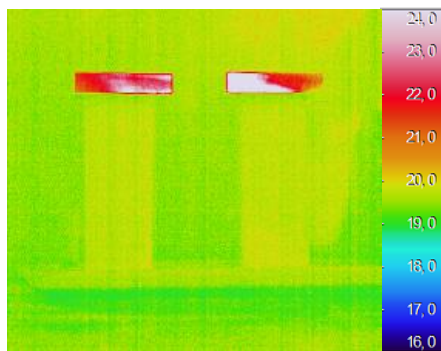


Figura 5.7 – Termograma dos provetes BC1.01 e BC3.01 (secos)

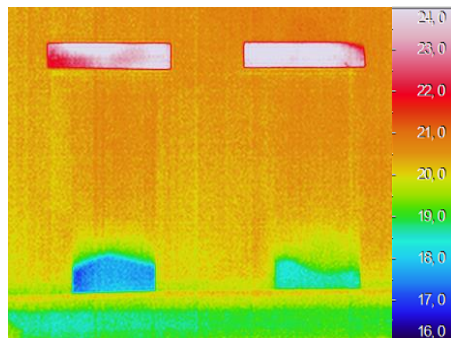


Figura 5.8 – Termograma dos provetes BC1.10 e BC3.10 (fase de embebição)

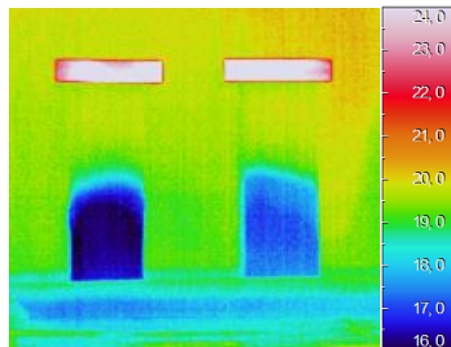


Figura 5.9 – Termograma dos provetes BC1.17 e BC3.17 (fase de embebição)

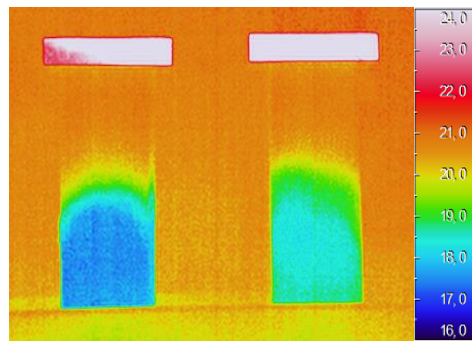


Figura 5.10 – Termograma dos provetes BC1.25 e BC3.25 (fase de secagem)

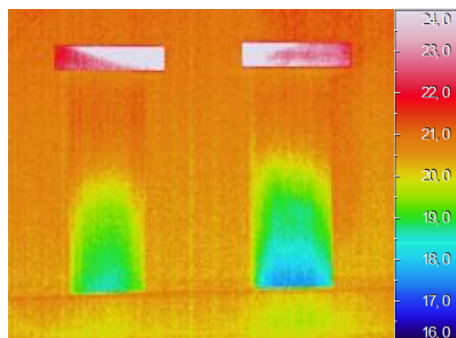


Figura 5.11 – Termograma dos provetes BC1.31 e BC3.31 (fase de secagem)

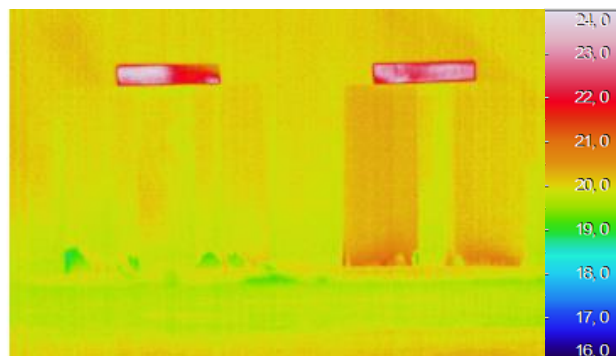


Figura 5.12 - Termograma dos provetes M1.01, M3.01, M4.01 e M5.01 (secos)

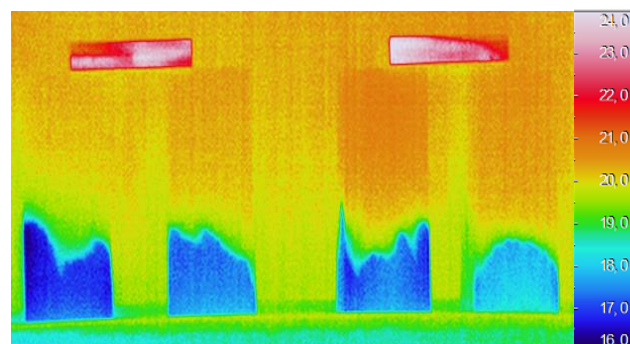


Figura 5.13 - Termograma dos provetes M1.10, M3.10, M4.10 e M5.10 (fase de embebição)

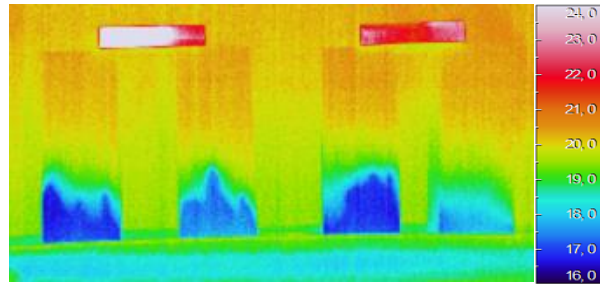


Figura 5.14- Termograma dos provetes M1.17, M3.17, M4.17 e M5.17 (fase de embebição)

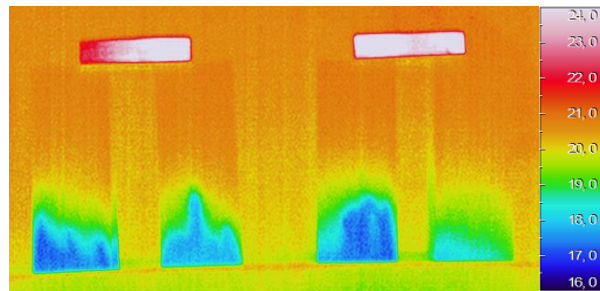


Figura 5.15 - Termograma dos provetes M1.25, M3.25, M4.25 e M5.25 (fase de secagem)

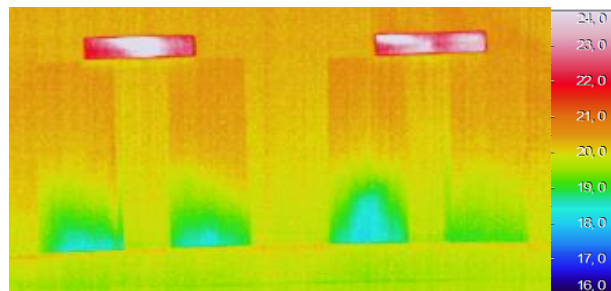


Figura 5.16 - Termograma dos provetes M1.31, M3.31, M4.31 e M5.31 (fase de secagem)

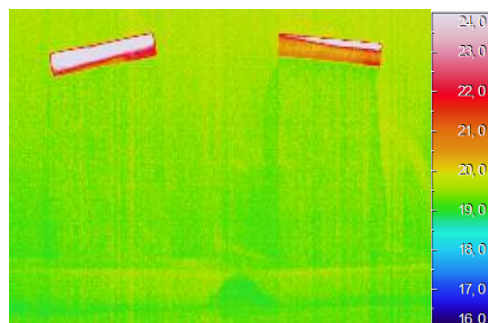


Figura 5.17 – Termograma dos provetes G1.01 e G3.01 (secos)

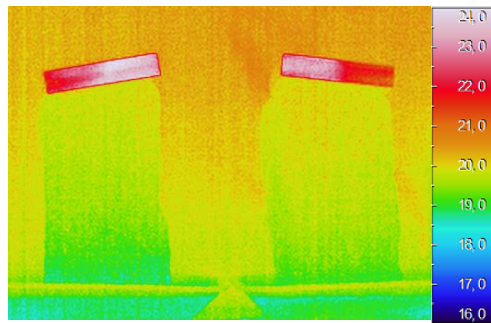


Figura 5.18 – Termograma dos provetes G1.10 e G3.10 (fase de embebição)

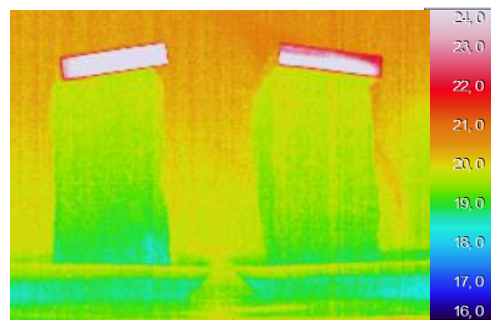


Figura 5.19 – Termograma dos provetes G1.17 e G3.17 (fase de embebição)

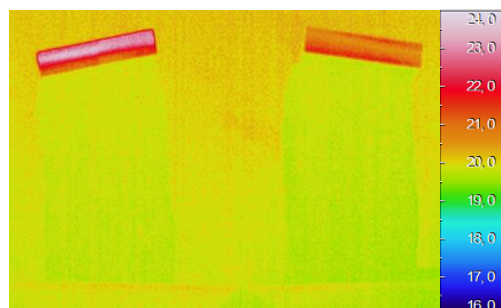


Figura 5.20 – Termograma dos provetes G1.25 e G3.25 (fase de secagem)

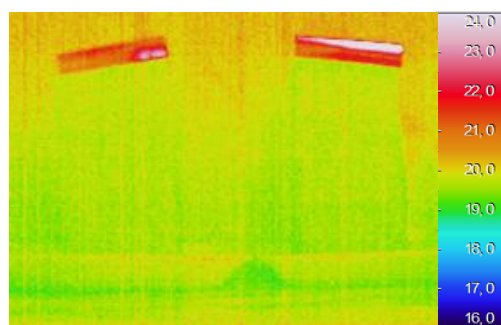


Figura 5.21 – Termograma dos provetes G1.31 e G3.31 (fase de secagem)

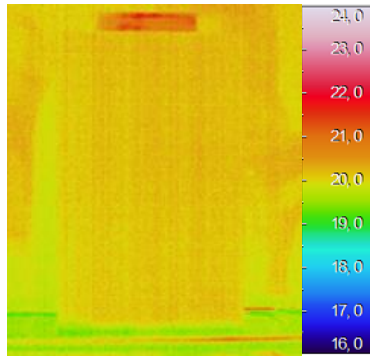


Figura 5.22 – Termograma dos provetes TC1.01 (secos)

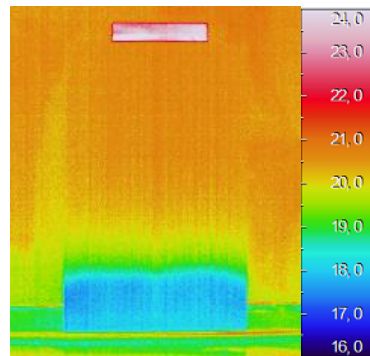


Figura 5.23 – Termograma dos provetes TF1.10 (fase de embebição)

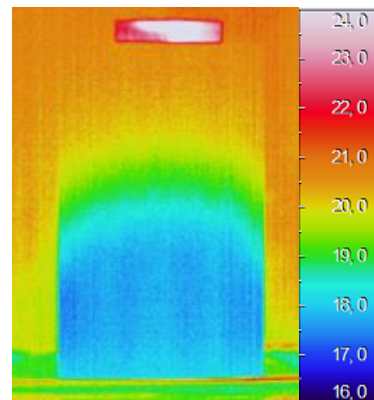


Figura 5.24 – Termograma dos provetes TF1.17 (fase de embebição)

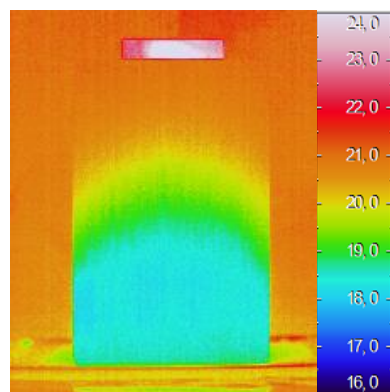


Figura 5.25 – Termograma dos provetes TF1.25 (fase de secagem)

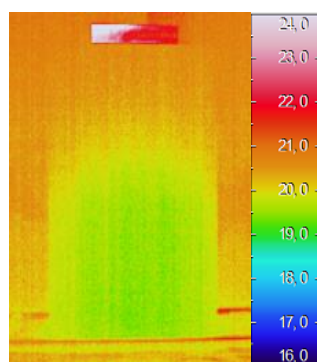


Figura 5.26 – Termograma dos provetes TF1.31 (fase de secagem)

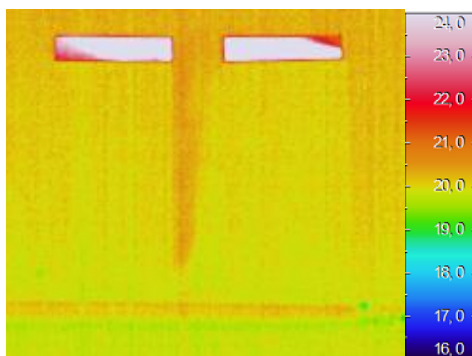


Figura 5.27 – Termograma dos provetes TM1.01 (secos)

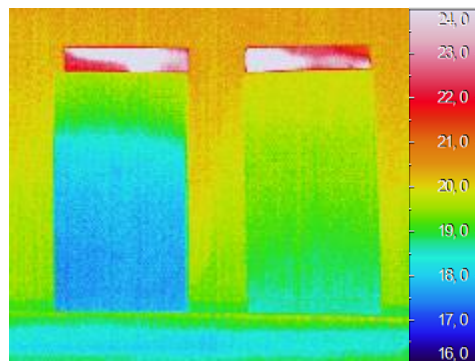


Figura 5.28 – Termograma dos provetes TM1.10 (fase de embebição)

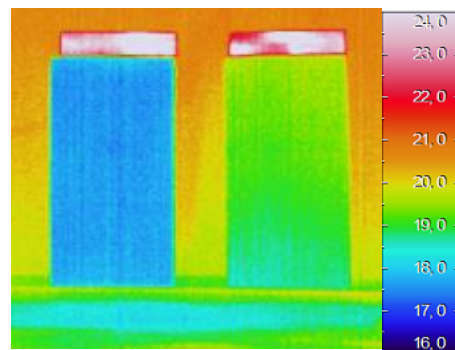


Figura 5.29 – Termograma dos provetes TM1.17 (fase de embebição)

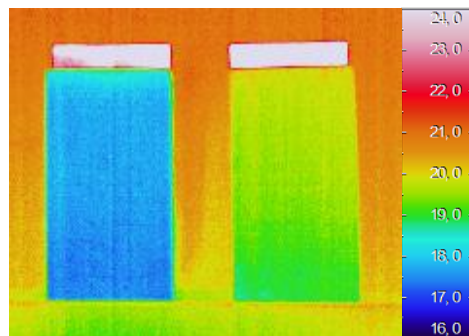


Figura 5.30 – Termograma dos provetes TM1.25 (fase de secagem)

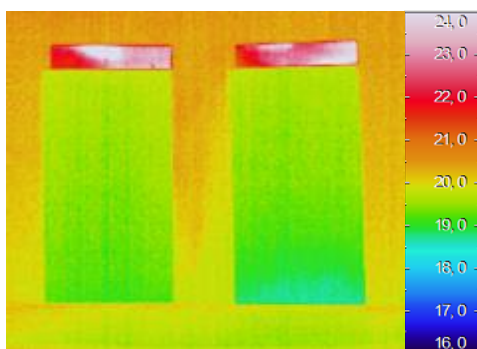


Figura 5.31 – Termograma dos provetes TM1.31 (fase de secagem)

Fase II

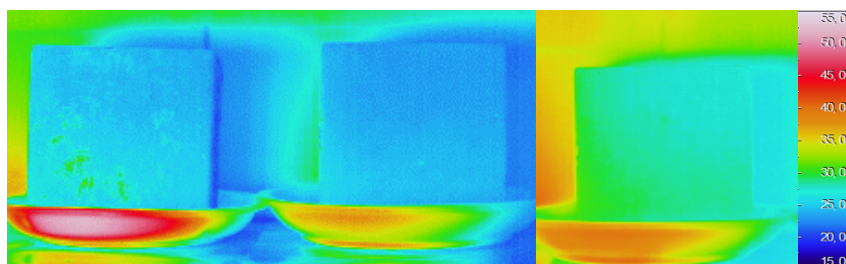


Figura 5.32 – Termograma dos provetes BB1.01, BB2.01, BB3.01 (secos)

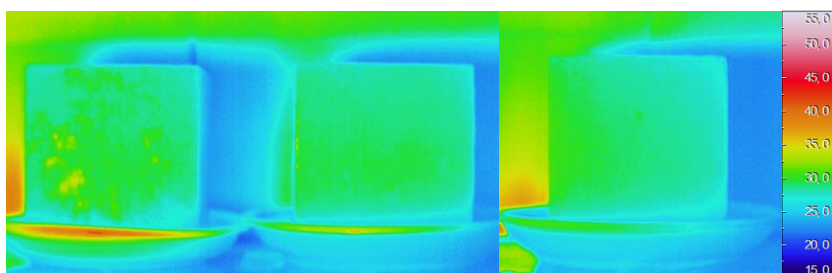


Figura 5.33 – Termograma dos provetes BB1.35, BB2.35, BB3.35 (fase de embebição)

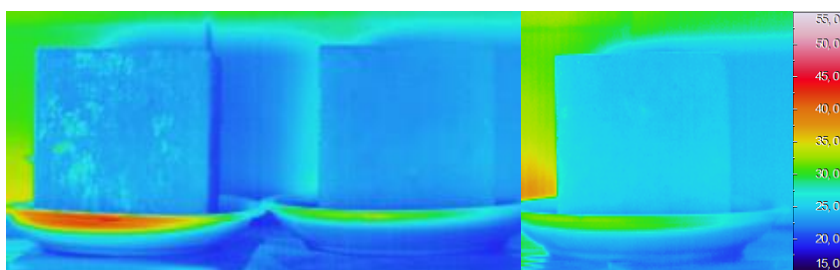


Figura 5.34 – Termograma dos provetes BB1.68, BB2.68, BB3.68 (fase de embebição)

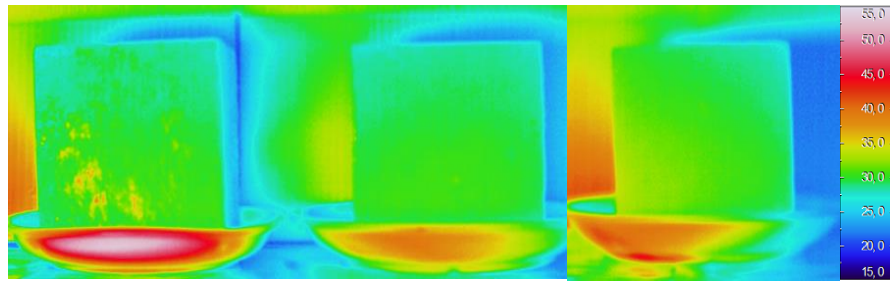


Figura 5.35 – Termograma dos provetes BB1.100, BB2.100, BB3.100 (fase de secagem)

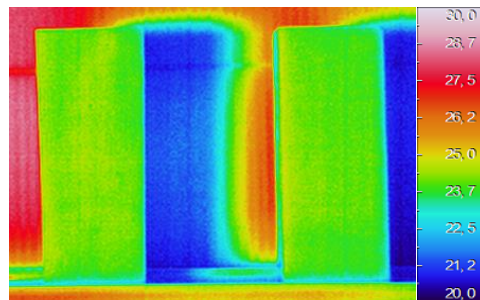


Figura 5.36 – Termograma dos provetes BC1.01 e BB3.01 (secos)

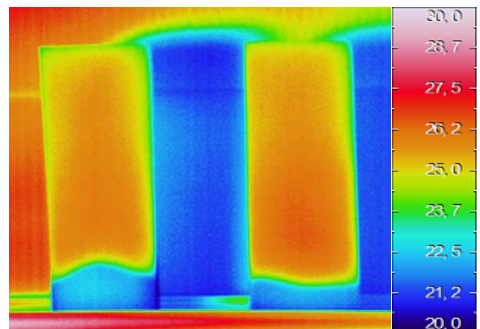


Figura 5.37 – Termograma dos provetes BC1.35 e BB3.35 (fase de embebição)

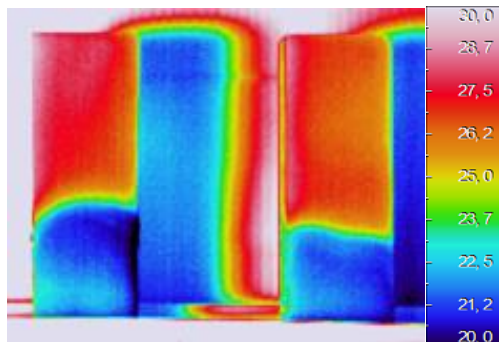


Figura 5.38 – Termograma dos provetes BC1.68 e BB3.68 (fase de embebição)

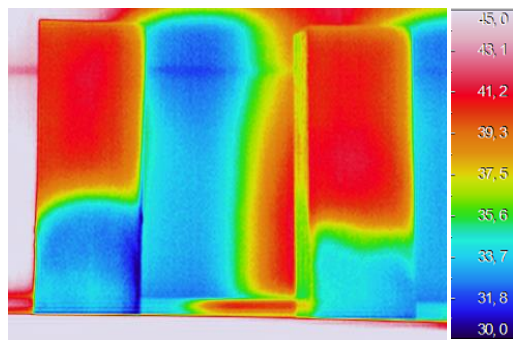


Figura 5.39 – Termograma dos provetes BC1.100 e BB3.100 (fase de secagem)

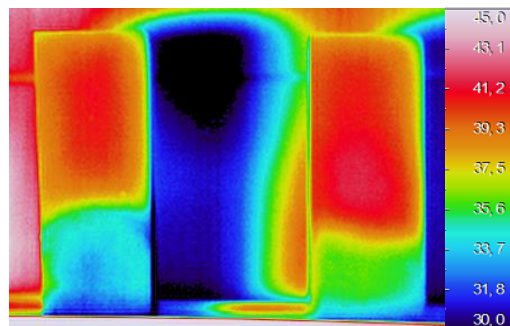


Figura 5.40 – Termograma dos provetes BC1.135 e BB3.135 (fase de secagem)

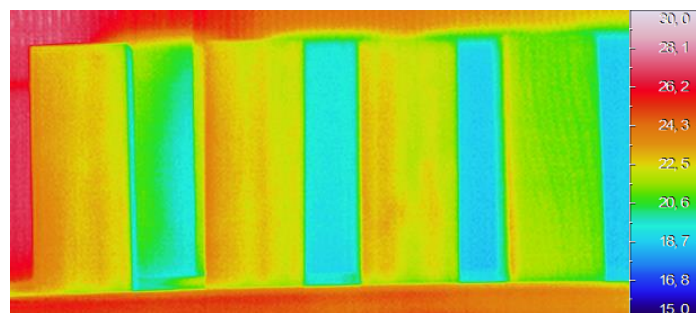


Figura 5.41 – Termograma dos provetes M1.01, M3.01, M4.01 e M5.01 (secos)

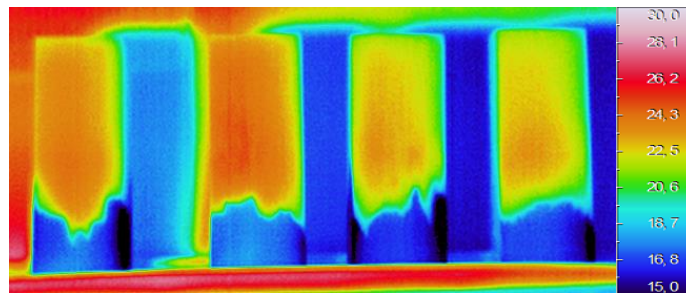


Figura 5.42 – Termograma dos provetes M1.35, M3.35, M4.35 e M5.35 (fase de embebição)

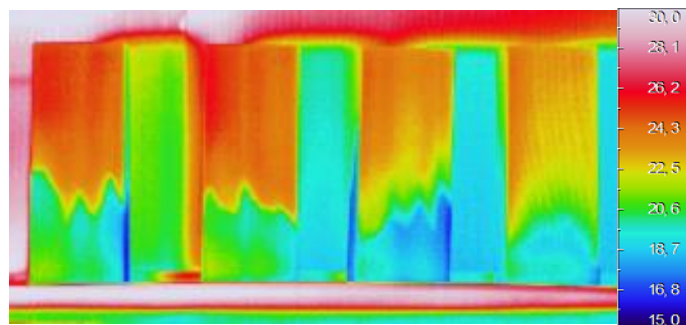


Figura 5.43 – Termograma dos provetes M1.68, M3.68, M4.68 e M5.68 (fase de embebição)

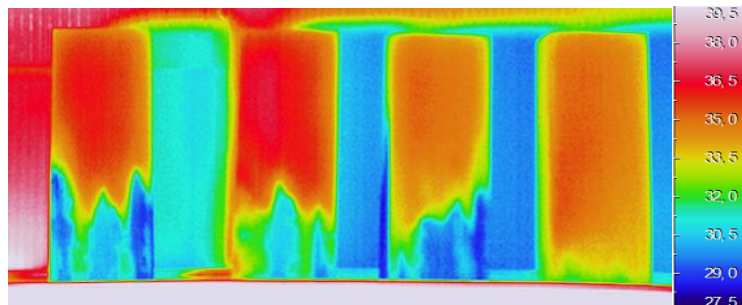


Figura 5.44 – Termograma dos provetes M1.100, M3.100, M4.100 e M5.100 (fase de secagem)

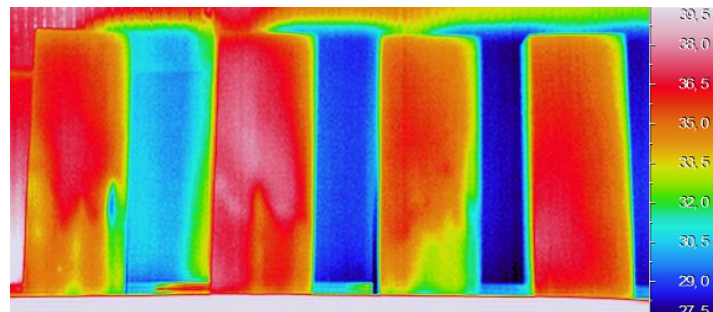


Figura 5.45 – Termograma dos provetes M1.135, M3.135, M4.135 e M5.135 (fase de secagem)

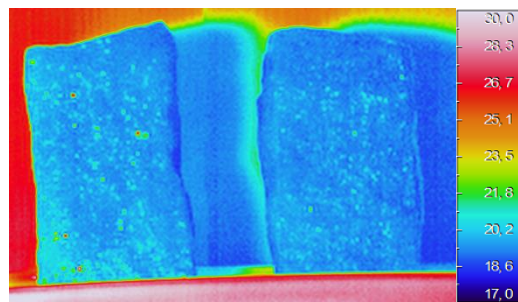


Figura 5.46 – Termograma dos provetes G1.01 e G3.01 (secos)

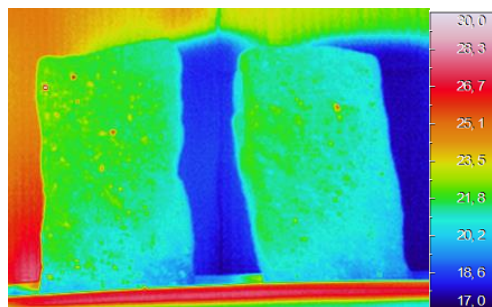


Figura 5.47 – Termograma dos provetes G1.35 e G35 (fase de embebição)

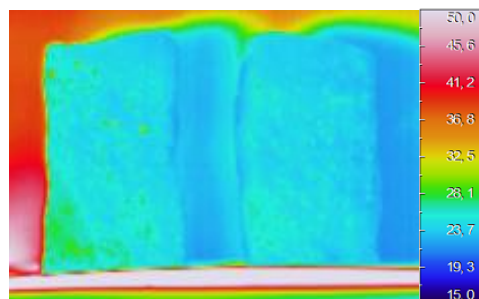


Figura 5.48– Termograma dos provetes G1.68 e G68 (fase de embebição)

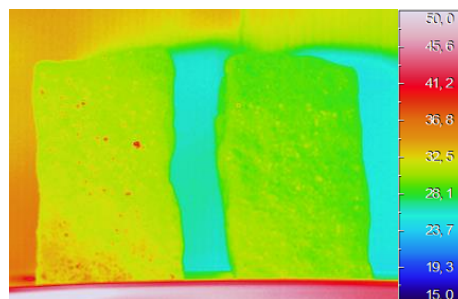


Figura 5.49 – Termograma dos provetes G1.100 e G100 (fase de secagem)

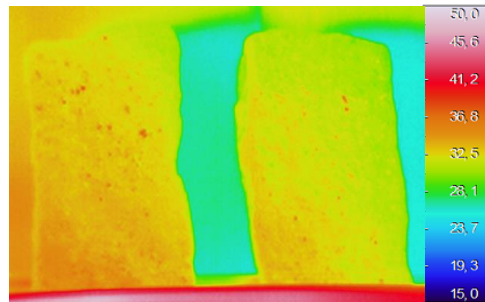


Figura 5.50 – Termograma dos provetes G1.135 e G135 (fase de secagem)

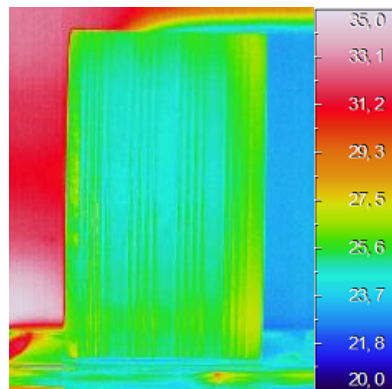


Figura 5.51 – Termograma dos provetes TF1.01 (seco)

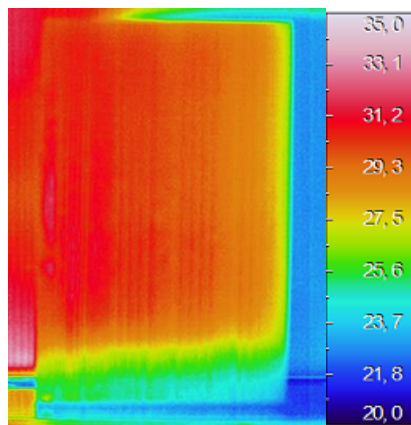


Figura 5.52 – Termograma dos provetes TF1.35 (fase de embebição)

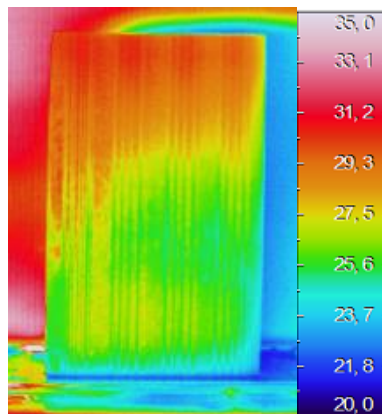


Figura 5.53 – Termograma dos provetes TF1.68 (fase de embebição)

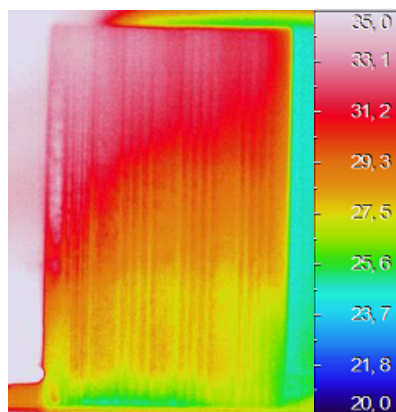


Figura 5.54 – Termograma dos provetes TF1.100 (fase de secagem)

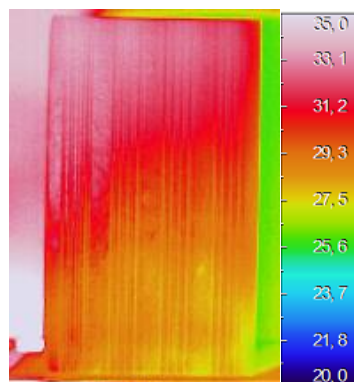


Figura 5.55 – Termograma dos provetes TF1.135 (fase de secagem)

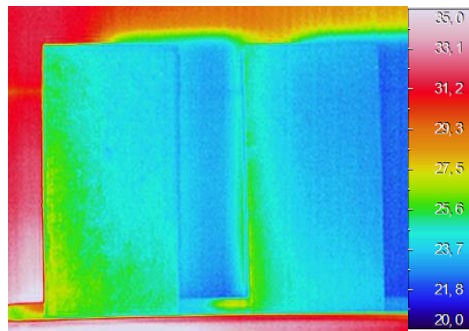


Figura 5.56 – Termograma dos provetes TM1.01 e TM3.01 (secos)

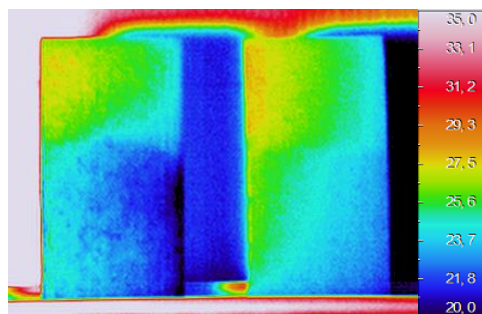


Figura 5.57 - Termograma dos provetes TM13.35 e TM3.35 (fase de embebição)

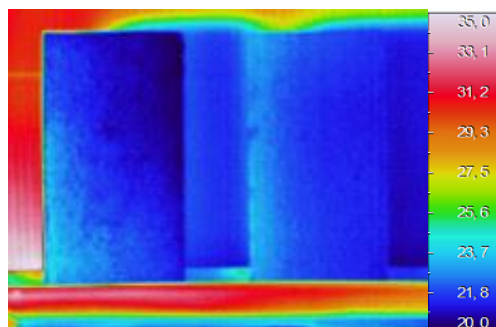


Figura 5.58 - Termograma dos provetes TM1.68 e TM3.68 (fase de embebição)

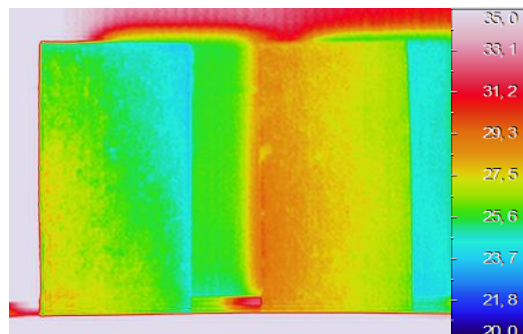


Figura 5.59 - Termograma dos provetes TM1.100 e TM3.100 (fase de secagem)

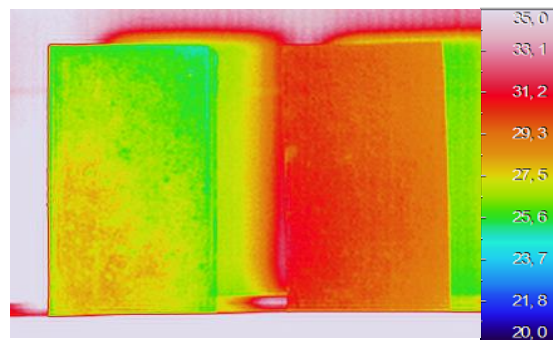


Figura 5.60 - Termograma dos provetes TM1.135 e TM3.135 (fase de secagem)

Fase III

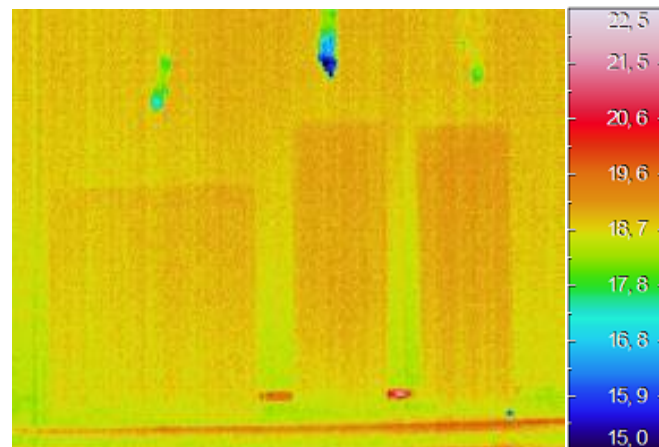


Figura 5.61 – Termograma do provete BB4.01, M4.01 e M6.01 (secos)

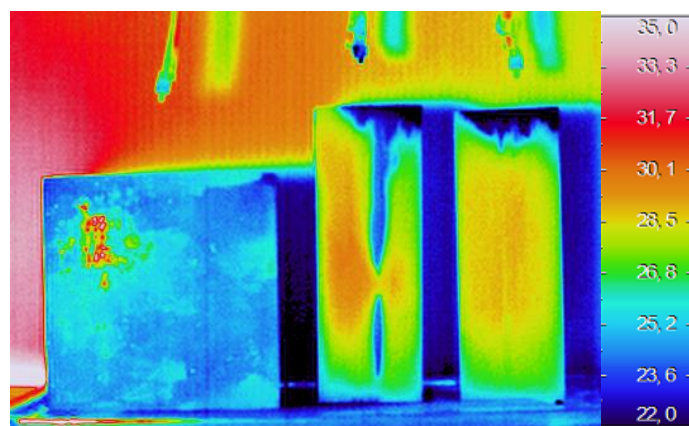


Figura 5.62 – Termograma do provete BB4.10, M4.10 e M6.10 (fase de embebição com lâmpada infravermelha ligada)

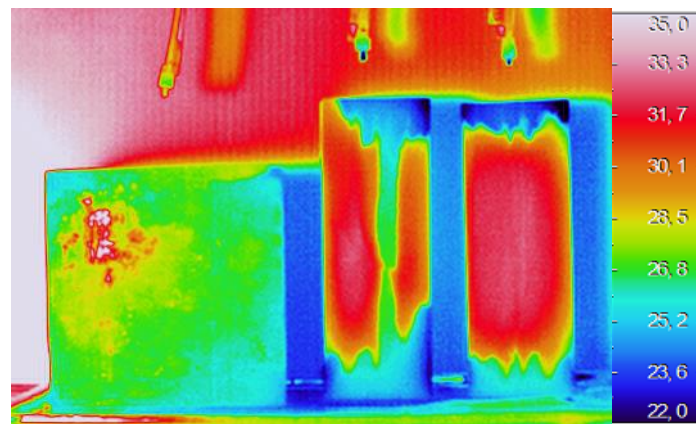


Figura 5.63 – Termograma do provete BB4.26, M4.26 e M6.26 (fase de embebição com lâmpada infravermelha ligada)

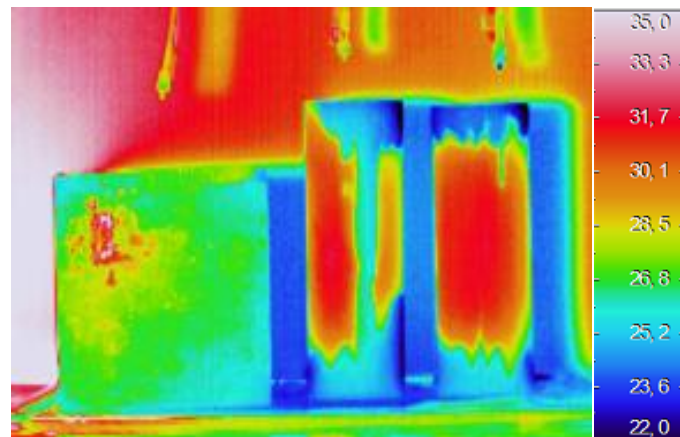


Figura 5.64 – Termograma do provete BB4.26, M4.26 e M6.26 (fase de embebição com lâmpada infravermelha ligada)

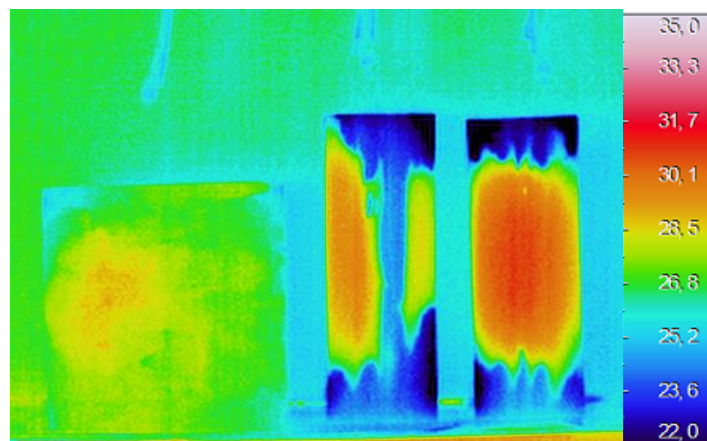


Figura 5.65 – Termograma do provete BB4.27, M4.27 e M6.27 (fase de embebição com lâmpada infravermelha desligada)

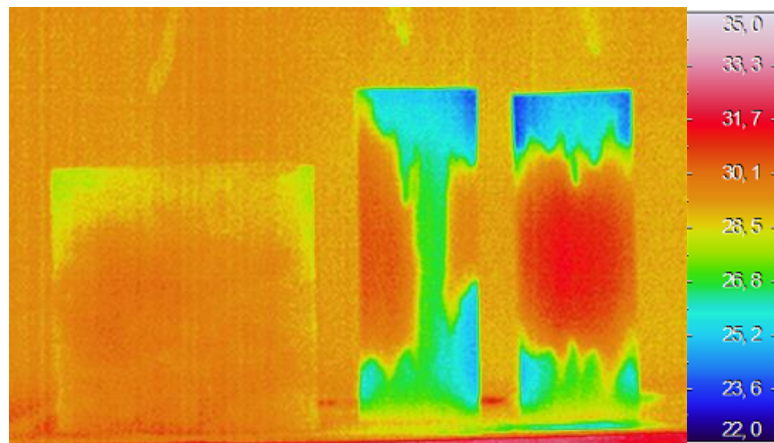


Figura 5.66 – Termograma do provete BB4.35, M4.35 e M6.35 (fase de embebição com lâmpada infravermelha desligada)

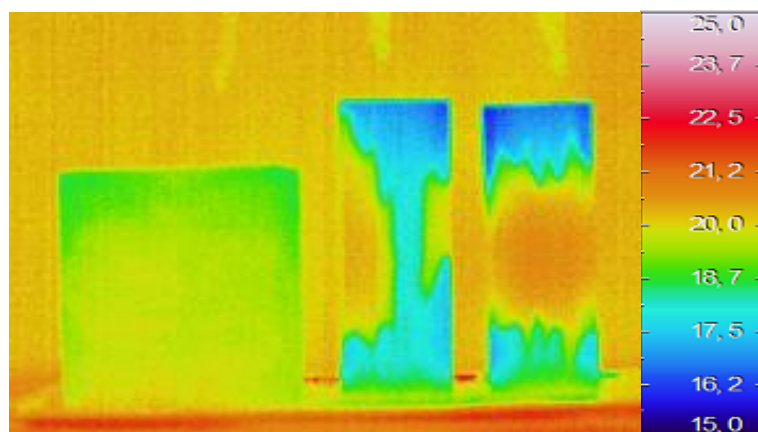


Figura 5.67 – Termograma do provete BB4.45, M4.45 e M6.45 (fase de embebição com lâmpada infravermelha desligada)

Fase IV

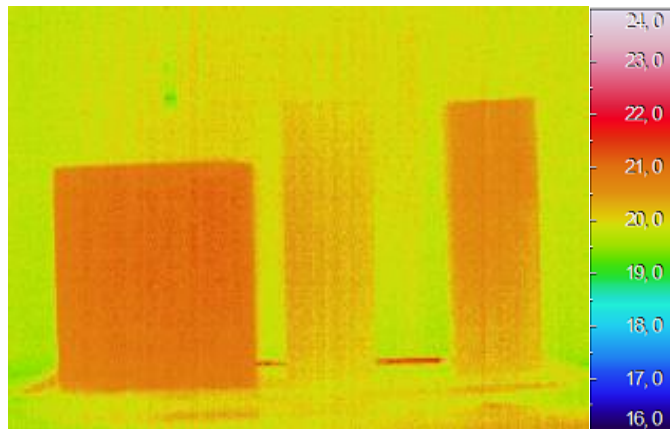


Figura 5.68 – Termograma do provete BB4.01, M4.01 e M6.01 (secos)

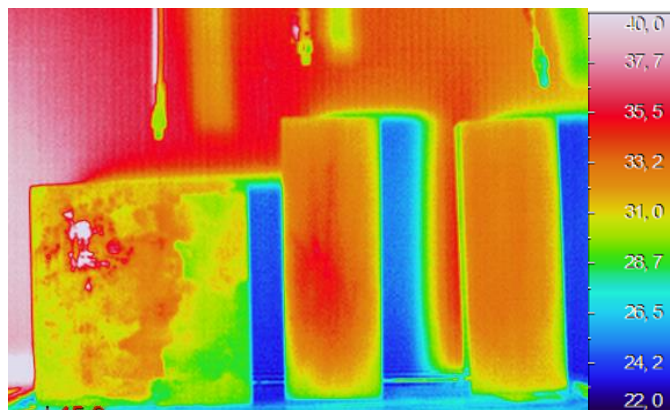


Figura 5.69 – Termograma do provete BB4.10, M4.10 e M6.10 (secos com lâmpada infravermelha ligada)

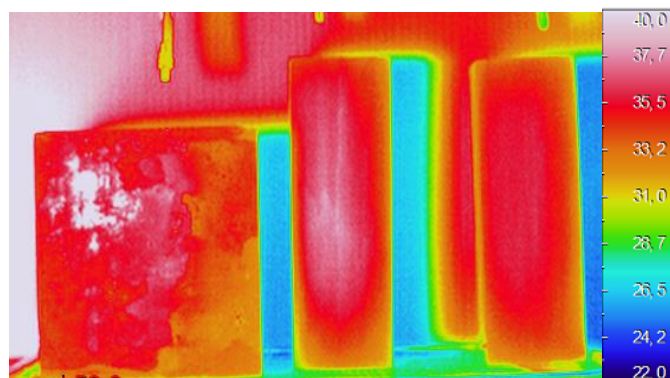


Figura 5.70 – Termograma do provete BB4.20, M4.20 e M6.20 (secos com lâmpada infravermelha ligada)

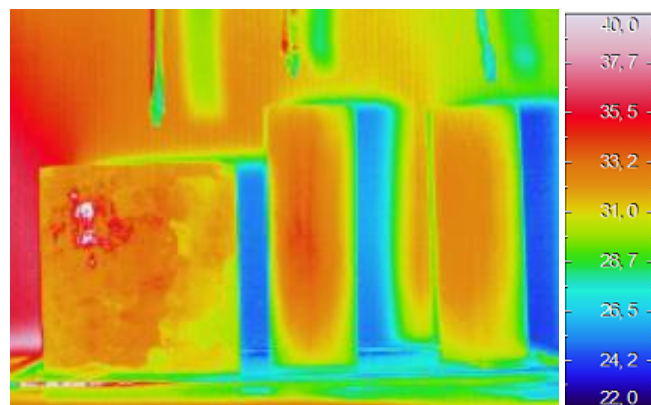


Figura 5.71 – Termograma do provete BB4.26, M4.26 e M6.26 (secos com lâmpada infravermelha ligada)

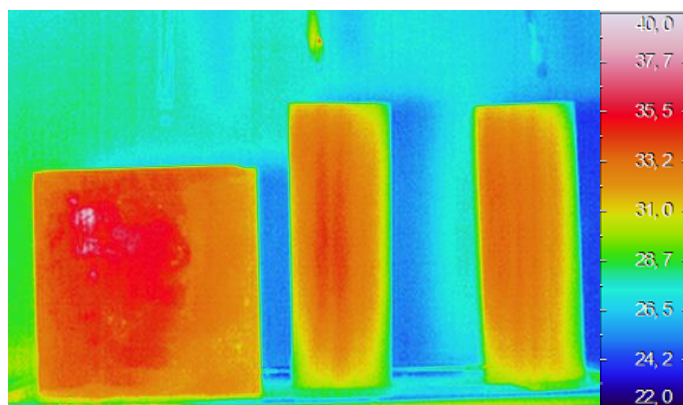


Figura 5.72 – Termograma do provete BB4.27, M4.27e M6.27 (secos com lâmpada infravermelha desligada)

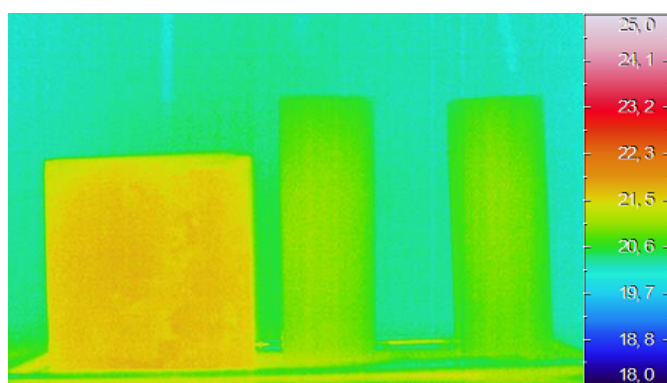


Figura 5.73 – Termograma do provete BB4.35, M4.35 e M6.35 (secos com lâmpada infravermelha desligada)

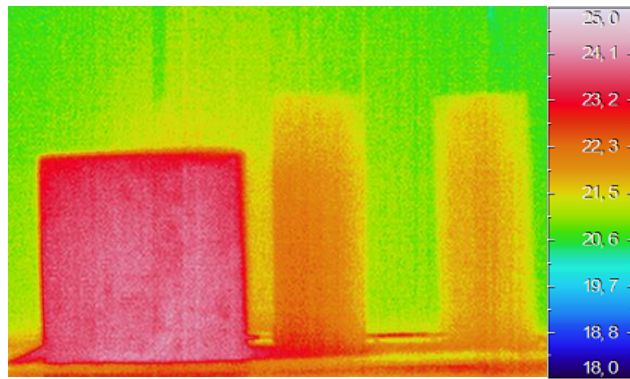


Figura 5.74 - Termograma do provete BB4.45, M4.45 e M6.45 (secos com lâmpada infravermelha desligada)

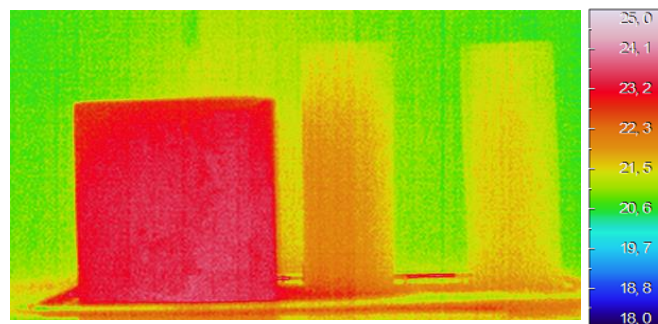


Figura 5.75 - Termograma do provete BB4.51, M4.51 e M6.51 (secos com lâmpada infravermelha desligada)

